



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA – FAEN  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA



JOÃO VÍTOR HERCULANO CLEMENTINO DOS SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES REVESTIMENTOS  
INIBIDORES DE CORROSÃO EM UM AÇO MICROLIGADO

DOURADOS – MS

2023

JOÃO VÍTOR HERCULANO CLEMENTINO DOS SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES REVESTIMENTOS  
INIBIDORES DE CORROSÃO EM UM AÇO MICROLIGADO

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edilson Nunes Pollnow

Área de concentração:3.05.00.00-1

DOURADOS - MS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S237a Santos, João Vitor Herculano Clementino Dos  
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES REVESTIMENTOS INIBIDORES DE  
CORROSÃO EM UM AÇO MICROLIGADO [recurso eletrônico] / João Vitor Herculano  
Clementino Dos Santos. -- 2023.  
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Edilson Nunes Pollnow.  
TCC (Graduação em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2023.  
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:  
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Desgastes. 2. Inibidores de corrosão. 3. Aço microligado. 4. ASTM 131 AH36. I. Pollnow,  
Edilson Nunes. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

---

**ANEXO D - AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Aluno: **JOÃO VÍTOR HERCULANO CLEMENTINO DOS SANTOS**

Título do trabalho e subtítulo (se houver): **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES REVESTIMENTOS INIBIDORES DE CORROSÃO EM UM AÇO MICROLIGADO.**

**BANCA EXAMINADORA**

**1. Presidente (orientador):**

Prof. Dr. Edilson Nunes Pollnow, Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

**2. Membro:**

Prof. Dr. Rafael Ferreira Gregolin, Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

**3. Membro:**

Prof. Dr. Bruno Arantes Moreira, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

De acordo com o grau final obtido pelo aluno, nós da banca examinadora, declaramos **APROVADO** (Aprovado/Reprovado) o aluno acima identificado, na componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-II) de Graduação no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados.

Dourados, 04 de Maio de 2023.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** EDILSON NUNES POLLNOW  
Data: 08/05/2023 11:01:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Edilson Nunes Pollnow

---

Prof. Dr. Rafael Ferreira Gregolin

---

Prof. Dr. Bruno Arantes Moreira

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus por me guiar nesta caminhada, permitindo-me a realização de mais um sonho. Por estar presente em cada detalhe de minha vida, e por nunca ter me deixado desistir nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais Josildo e Edinetei, pessoas nos quais me espelho e admiro. A genuína forma de amor, respeito, paciência e dedicação, que proporcionaram a base dos meus estudos e a formação do meu caráter. Serei eternamente grato, não estaria aqui hoje sem vocês.

À minha irmã Jade Ellen, melhor amiga e companheira para todos os momentos, sempre estarei aqui para eternizar as nossas mais divertidas e singelas lembranças.

Aos meus avós José e Eudália, os tios Edson, Edvonei e Ediveti pelo acolhimento e conselhos a mim passados. Estarão eternamente em meu coração.

Meu agradecimento minha namorada, Rafaela, por me passar a sensação de conforto e tranquilidade, por todo amor e paciência durante parte desta trajetória. Que me faz redescobrir sentimentos e buscar evoluir a cada dia.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edilson Nunes Pollnow, pela atenção, dedicação e paciência em transmitir seu vasto conhecimento. Pela confiança depositada a mim, e apoio durante a execução deste trabalho.

Não menos importante, a todos os técnicos da Faculdade de engenharia – UFGD que disponibilizaram e destinaram parte de seus tempos para auxiliar nas etapas elaboradas em laboratórios.

## RESUMO

Os maiores índices de corrosão de metais estão presentes em regiões costeiras devido a maresia, na qual há gotículas que se deslocam pelo ar e possuem grandes concentrações de cloreto de sódio (NaCl). Este composto químico é responsável diretamente por provocar a oxirredução de metais por intermédio do oxigênio e a superfície metálica, resultante da formação de uma ponte salina. O custo anual em razão da corrosão pode chegar em torno dos 3% do PIB de países industrializados. Nestes contextos há necessidade de uma investigação constante para redução de custo e para um maior proveito dos materiais, onde revelam-se maneiras de reduzir este efeito, como a aplicação de inibidores de corrosão. O processo consiste em revestir as superfícies dos materiais originando a formação de películas protetoras, no qual pode ser efetivo para múltiplos tipos de desgastes. O presente estudo busca avaliar a eficácia de três modelos básicos de revestimentos encontrados no mercado, para a aplicação em um aço microligado de alta resistência e baixa liga, habitualmente utilizado para construção naval. Para esse propósito, foi efetuado o ensaio de imersão em banho salino para oito amostras, sendo elas separadas em três pares com modelos de revestimento distintos e um par totalmente neutro. O ensaio para a análise de corrosão foi efetuado pelo método de banho salino, no qual todas as amostras foram submersas em mistura a base de água e cloreto de sódio (5%), com tempo estipulado de ensaio de 3 dias e 7 dias. Foi selecionado para o estudo o aço ASTM 131 AH36, em que foram submetidos a três revestimentos distintos, sendo eles a Tinta Spray, Galvanização a frio e Primer Pu + Tinta spray, utilizando como referência um par de amostras sem revestimentos. Os resultados obtidos evidenciaram um aumento significativo para resistência à corrosão em razão dos inibidores, e por consequência, na vida útil do metal. Houve uma obtenção positiva no combate à corrosão para todos os revestimentos aplicados, com consideráveis reduções de até 3 vezes para a Galvanização a frio e até 15 vezes para o Primer Pu + Tinta Spray.

**Palavras-chave:** Desgastes, inibidores de corrosão, aço microligado, ASTM 131 AH36.

## ABSTRACT

The highest rates of corrosion of metals are present in coastal regions due to sea air, in which there are droplets that move through the air and have high concentrations of sodium chloride (NaCl). This chemical compound is directly responsible for causing the oxidation of metals through oxygen and the metallic surface, resulting from the formation of a salt bridge. The annual cost due to corrosion can reach around 3% of GDP in industrialized countries. In these contexts, there is a need for constant research for cost reduction and for a greater use of materials, where ways to reduce this effect are revealed, such as the application of corrosion inhibitors. The process consists of coating the surfaces of materials resulting in the formation of protective films, which can be effective for multiple types of wear. The present study seeks to evaluate the effectiveness of three basic models of coatings found on the market, for application in a high-strength, low-alloy microalloyed steel, commonly used in shipbuilding. For this purpose, an immersion test in a saline bath was carried out for eight samples, which were separated into three pairs with different coating models and a totally neutral pair. The test for the corrosion analysis was carried out using the saline bath method, in which all samples were submerged in a mixture based on water and sodium chloride (5%), with a stipulated test time of 3 days and 7 days. Steel ASTM 131 AH36 was selected for the study, in which they were subjected to three different coatings, namely Spray Paint, Cold Galvanizing and Primer Pu + Spray Paint, using as reference a pair of samples without coatings. The results obtained showed a significant increase in corrosion resistance due to the inhibitors, and consequently, in the useful life of the metal. There was a positive achievement in combating corrosion for all applied coatings, with considerable reductions of up to 3 times for Cold Galvanizing and up to 15 times for Primer Pu + Spray Paint.

**Keywords:** Wear, corrosion inhibitors, microalloyed steel, ASTM AH36.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corrosão uniforme .....	16
Figura 2: Corrosão por placas.....	17
Figura 3: Corrosão alveolar .....	17
Figura 4: Corrosão por pite.....	18
Figura 5: Corrosão intergranular .....	18
Figura 6: Corrosão intragranular .....	19
Figura 7: Corrosão filiforme.....	19
Figura 8: Corrosão gráfitica.....	20
Figura 9: Corrosão por Dezincificação.....	20
Figura 10: Corrosão empolamento por hidrogênio .....	21
Figura 11: Corrosão em torno do cordão de solda.....	21
Figura 12: Corrosão por esfoliação .....	22
Figura 13: Fluxograma das classificações de inibidores de corrosão.....	24
Figura 14: Fluxograma metodológico do processo .....	30
Figura 15: Revestimentos utilizados .....	31
Figura 16: Ilustração das amostras .....	32
Figura 17: Amostras a) antes e b) depois de preparadas .....	33
Figura 18: Sistema adaptado.....	35
Figura 19: Resíduos resultantes do ensaio nas amostras C_1.1 e C_2.1 .....	36
Figura 20: Amostras após 3 dias de ensaio .....	37
Figura 21: Amostras após 7 dias de ensaio .....	37
Figura 22: Gráfico da taxa de corrosão .....	39
Figura 23: Rompimento da Película .....	40
Figura 24: Descascamentos da película.....	40

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Composição química dos AH36 determinada pela norma ASTM A131 .....	29
Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço AH36 determinada pela norma ASTM A131.....	29
Tabela 3: Organização e planejamento para os períodos de teste .....	33
Tabela 4: Massa total das amostras antes do início do ensaio.....	34
Tabela 5: Perda de massa.....	38
Tabela 6: Taxa de corrosão.....	38

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	9
2	OBJETIVOS .....	11
2.1	Objetivo geral .....	11
2.2	Objetivo específico.....	11
3	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....	12
3.1	Engenharia de Superfície.....	12
3.2	Desgastes .....	12
3.2.1	Tipos de desgastes .....	13
3.2.2	Corrosão.....	14
3.3	Formas de corrosão .....	15
3.3.1	Características fundamentais de diferentes formas de corrosão. ....	16
3.4	Tipos de Inibidores .....	22
3.5	Classificação dos inibidores .....	23
3.5.1	Inibidores Anódicos.....	24
3.5.2	Inibidores Catódicos .....	25
3.5.3	Revestimentos.....	25
3.6	Taxa de corrosão .....	26
3.7	Aços microligados.....	27
3.7.1	Aço AH36.....	28
4	METODOLOGIA.....	30
4.1	Materiais utilizados .....	31
4.2	Preparação das amostras.....	32
4.2.1	Corte .....	32
4.2.2	Inibidores .....	33
4.2.3	Ensaio de ataque corrosivo .....	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	36
5.1	Cálculo da taxa de corrosão.....	38
6	CONCLUSÃO .....	42
7	REFERÊNCIAS .....	44
	APÊNDICES .....	48
	Apêndice A - Medição das massas das amostras antes e depois do ensaio.....	48

## 1 INTRODUÇÃO

As ligas metálicas apresentam grande aplicação na engenharia, devido sua versatilidade de propriedades mecânicas em função das diferentes combinações de elementos químicos, por isso, são vastamente utilizados em diversos âmbitos e condições de trabalho, deste modo, sujeitos a múltiplos meios de desgaste.

Em função da ampla gama de tipos de desgastes, é importante uma análise inicial dos requisitos de projeto para aplicação metálica, considerando os fatores climáticos, salubridade, contato mecânico ou com reagentes químicos. Estas condições são responsáveis por acelerar a deterioração dos metais, limitando a um menor período a sua vida útil.

O desgaste abrasivo é estabelecido como degeneração e comprometimento da superfície sólida do material, definido pela ASTM (FERRARINI, 1998). Independentemente de ser responsável pelo comprometimento dos metais em situações específicas, este tipo de desgaste também é usado como um sistema de polimento, formalizado por irregularidades como detritos, grãos e relevos responsáveis por deformações plásticas ou por remoção de materiais em forma de cavaco (GENTIL, 2022). A ciência responsável por solucionar estes tipos de problemas é chamada de engenharia de superfícies, e engloba diversas técnicas de modificação superficial a fim de reduzir significativamente o efeito dos desgastes.

A deterioração concernente aos materiais metálicos sucede em geral por reações químicas, eletroquímicas ou eletrolítica, podendo ser também resultante de um trabalho mecânico contínuo localizado. Os efeitos do desgaste, assim como as variações químicas e modificações estruturais resultantes destes processos podem promover o decaimento da eficiência ou incapacitar seu funcionamento (GENTIL, 2003).

A maresia possui ampla influência sobre o desgaste dos metais por efeito de sua alta concentração de cloretos. Este composto químico trata-se de um padrão iônico constituído por átomos de cloro negativamente carregados. Estes íons proporcionam um modelo de ponte salina entre o metal e o oxigênio, sucedendo em oxirredução por processo eletroquímico no material exposto em um curto período (WARTHA et al., 2007).

Os revestimentos metálicos são umas das diretrizes operadas para a prevenção contra as degradações, que se dá a partir da aplicação de uma película de óxidos e hidróxidos na superfície metálica, que preservam os metais contra compostos oxidantes externos. Os insumos bases comumente usados para o envoltório são o cromo, níquel e zinco. Para fins anticorrosivos, o tratamento por galvanização corresponde grandiosamente (OLIVEIRA, 2012).

A galvanização descrita por Silva Filho (2020) é caracterizada por duas metodologias distintas, a imersão a quente e a imersão a frio.

A imersão a quente apresenta um maior custo de execução, contudo, melhores resultados e durabilidade, sendo que a peça recebe a camada involucra pela metodologia do banho de zinco fundido.

Para a imersão a frio, encontra-se um menor valor de mercado, e seu procedimento pode ser efetuado por spray aerossol a base de zinco, tintas ou por meio de eletrólise. Ambos os métodos consistem na blindagem sob a peça em questão. É fundamental que haja um nível adequado de aderência e compatibilidade da camada de metal base, uma vez que, se trata de fatores determinantes para o seguimento de blindagem e proteção do componente. Esta técnica permite também intensificar a resistência mecânica, o endurecimento superficial, assim como a função termoelétrica da peça (OLIVEIRA, 2012).

Investigando os efeitos de revestimentos de superfícies contra corrosões atmosférica, o presente estudo faz uma análise comparativa subsequente ao aço ASTM A131 AH36 com revestimentos distintos. O corpo de prova será submetido à imersão em banho salino, com o intuito de simular as regiões litorâneas e a decorrência da maresia, procurando observar variações químicas, perda de massa decorrente de processos corrosivos nas peças submetidas ao ensaio, tencionando a investigação das transições e vida útil do aço com e sem a proteção.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente estudo objetiva simular condições de um ambiente marítimo, a fim de analisar os efeitos de inibidores de corrosão para metais.

### **2.2 Objetivo específico**

Avaliar o comportamento de um aço microligado sob condições de maresia e analisar a efetividade da aplicação de revestimentos como forma de reduzir a deterioração do material.

Realizar análise da taxa de corrosão das amostras com referencial à norma NACE RP-07-75.

### 3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

#### 3.1 Engenharia de Superfície

A engenharia de superfície consiste na solução dos problemas superficiais dos segmentos, que sofrem degradações tais como a corrosão ou fratura em decorrência de esforços mecânicos e reações químicas. Para isso, desenvolveu-se técnicas eficientes de suprimir e proteger a área externa do material (BATCHELOR et al., 2006).

Superficialmente os materiais de engenharia possuem atributos distintos que influenciam em sua funcionalidade e por consequência, sua vida útil. Estes podem ser submetidos a condições de trabalho desfavoráveis e de contextos severos combinados, nos quais têm de desempenhar suas atribuições diligentemente (CARVALHO, 2007).

As degradações de natureza física ou químicas podem coexistir de maneira interligada, de modo que ocasione o desgaste corrosivo. Este, procede de forma incontida também sob condições ambientais específicas, que irá diferir de acordo com a sua localidade. Existem inúmeras possibilidades de interligações que podem resultar na corrosão do material, e que devem ser previstas e analisadas (BATCHELOR et al., 2006).

#### 3.2 Desgastes

No sentido de designar materiais para a confecção de equipamentos ou instalações, interessa-se que estes disponham de resistência à múltiplos meios de desgastes, outrossim, excelentes propriedades mecânicas e boas especificações para a confecção.

O desgaste é definido como a redução gradativa de material localizado na superfície de um corpo em razão de ação mecânica, sendo resultado da interação direta e da cinesia relativa junto a um meio sólido, líquido e gasoso (DIN 50230 *apud* GAHR, 1987).

Independentemente de ser em grande parte prejudicial, há procedimentos na engenharia que utilizam destes meios a seu favor, como em operações de polimento, lixamento, do mesmo modo que, é exercido em processos de usinagem e desbastamento (OLIVEIRA, 2015)

Este regime sucede em numerosos setores da economia, como na indústria, agricultura, mineração, assim como está presente em projetos e produtos de alta tecnologia. O desgaste pode derivar na atenuação da eficiência do equipamento, ou até mesmo a sua improdutividade (FERRARINI, 1998). A resultante desses desgastes afeta diretamente cerca

de 1 a 5% do PIB em países desenvolvidos, evidenciando a extrema importância da aplicação de pesquisa e desenvolvimento (FIGUEIREDO NETO, 2017).

### 3.2.1 Tipos de desgastes

A literatura dispõe de inúmeros termos para caracterizar os meios de desgastes em resultado dos mecanismos de ação, dos quais comumente cita-se a abrasão, adesão, fadiga superficial, erosão, cavitação, corrosão entre outros (RIBEIRO, 2004).

O desgaste abrasivo sucede por intermédio do deslize de partículas com graus de dureza consideráveis sob a superfície do material, ocorrendo a remoção ou deslocamento de material por efeito do movimento relativo entre dois corpos distintos (HUTCHINGS, 1992). Este meio de desgaste considera-se como o mais ponderoso e habitual na indústria. Existem diferentes mecanismos para o desgaste abrasivo, sendo os principais, abrasão por goivagem, abrasão a alta tensão e abrasão a baixa tensão (OLIVEIRA, 2015).

Abrasão por goivagem: ocorre por meio de partículas abrasivas de grandes dimensões, necessitando de uma menor força para que danifique a superfície do metal (OLIVEIRA, 2015).

Abrasão a alta tensão: desgaste oriundo do esmagamento das partículas abrasivas sobre o metal, semelhante à uma prensa (OLIVEIRA, 2015).

Abrasão a baixa tensão: resultante do deslizamento de partículas soltas em contato com o componente. Não há eminência de grandes forças para que esse processo ocorra, desgastando o material por microusinagens (OLIVEIRA, 2015).

Desgaste adesivo é ocasionado quando há a interação entre duas superfícies, de modo que esse contato resulte em uma força de ligação adesiva, decorrente ao contato plástico das interfaces. O movimento relativo dos dois corpos promove uma deformação plástica, que por conseguinte pode se propagar em forma de trincas e fraturas. Os fragmentos em decorrência desse contato podem-se desprender da superfície e se transferir para a outra ou até mesmo torna-se partículas abrasivas para o processo (KATO; ADACHI, 2001, RABINOWICZ; 1995).

O desgaste por fadiga, de acordo com a ASTM E1823-13 (ASTM, 2013) concerne o método de transição permanente e gradativa na superfície do material, decorrente de uma aplicação cíclica de tensões que pode suceder em deformações, trincas ou rompimento de partículas na superfície ou logo abaixo dela. É encontrado três categorias de desgaste por fadiga, sendo elas as do tipo Pitting, Spalling e Brinelling (BEZERRA, 2016).

KAJDAS et al, (1990) descreve esses subconjuntos como:

Pitting: Fratura localizada associada à estresse contínuo decorrente de deslizamentos e rolamentos, responsável pela concepção de trincas superficiais;

Spalling: Sistema semelhante ao processo Pitting, destacando-se por sua remoção acentuada do material da superfície em formato de escamas, resultante do processo de lascamento;

Brinelling: Deformação plástica do material subsequente à superposição de cargas excessiva.

A erosão pode ser definida como desgaste progressivo da superfície sólida do material por meio da atuação mecânica de um fluido multicomponentes ou perante a colisões de partículas líquidas ou sólidas. O mecanismo de erosão depende das propriedades do material, e possui características distintas para materiais frágeis e dúcteis, em vista disso, sendo repartido em erosão frágeis e dúcteis (HELLE et al., 2004).

O desgaste por cavitação é descrito como resultante da composição e fluxo líquido, que gera bolhas abaixo da pressão de vapor, que ao se romperem sob a superfície provocam impacto e por conseguinte, corrosão e cavidades na superfície do material (SILVA, 2014).

A variação de pressão responsável por este fenômeno ocorre no decurso de agitação do líquido, ou aplicação de um campo de pressão ocasionado por movimentos de partículas sólidas no interior de um fluido estático. Portanto, a cavitação em um líquido pode ocorrer abaixando pressão a uma temperatura aproximadamente constante, geralmente controlada pelo fluxo dinâmico (FRANC et al., 2003).

### 3.2.2 Corrosão

Pode-se definir a corrosão como uma reação química heterogênea ou eletroquímica, influenciada diretamente pela condutividade iônica do ambiente, que pode gerar uma degradação do material e suas propriedades(ASM HANDBOOK, Corrosion 1992).

Segundo Gentil (2022), considera-se como oxidação-redução quaisquer reações químicas que compreende por ceder ou receber elétrons. Este processo pode ser compreendido como reações de oxidação dos metais, em que o material atua como um meio redutor, transferindo elétrons para a substância oxidante. Isto posto, identifica-se que a corrosão se desenvolve da superfície para o interior do material. Partindo em sua maior parte de forma espontânea, a corrosão aflige rigorosamente a conservação e a performance estimada do material para tais fins.

A corrosão dos materiais metálicos é caracterizada mediante aos processos de oxidação e redução, do qual ele opera a função de redutor concedendo elétrons para o fator oxidante, elemento presente no eletrólito ou em regiões propícias ao desgaste. A condutividade do eletrólito demonstra propriedades igualmente inversa à resistência corrosiva, isto é, quanto menor a condutividade, maior será a eficiência contra a corrosão. Tratando-se de um fenômeno espontâneo que aflige todas as estruturas metálicas, compreende-se como a decorrência de reações químicas ou eletroquímicas entre metais ou ligas metálicas no ambiente em que são expostos. É de extrema relevância combater este fenômeno de degradação, de modo a minimizar incidentes indesejáveis, assim como suscitar gastos para a economia (GENTIL 2022).

A taxa no qual o material é afetado pela corrosão pode estar diretamente relacionada com o aumento da temperatura, pressão e intensidade do meio corrosivo em questão. Para alguns metais, especialmente aços de baixa liga, pode ocorrer a formação de películas protetoras que combatem o intemperismo, convertendo-se em um material de maior resistência. Com o conhecimento dos meios agressivos e suas peculiaridades causadores da degradação dos materiais, é possível buscar diferentes formas para combater a corrosão de modo efetivo, considerando apenas dois fatores como a natureza do material e o meio corrosivo, ou eletrólito (FRAUCHES-SANTOS et al., 2014).

### 3.3 Formas de corrosão

Para a subsequência, evidencia-se os tipos corrosivos predominantes decorrente de oxidação-redução, reações cujo há a troca de elétrons entre o material e o meio corrosivo.

Gentil (2022) afirma que, há a possibilidade do manifesto de diferentes classes de corrosão, no qual podem ser distinguidos por seus aspectos físicos, forma de ataque sob diferentes causas e seus mecanismos. Em síntese, encontra-se corrosão de acordo com:

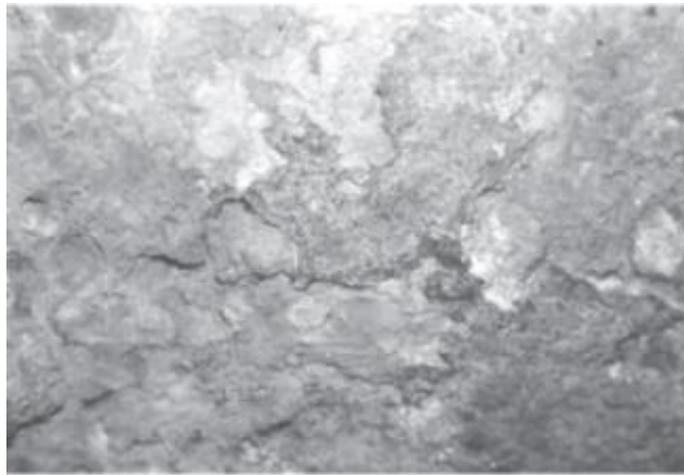
A morfologia – uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular, intragranular, filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno do cordão de solda e empolamento por hidrogênio;  
As causas e mecanismos – por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas, em torno do cordão de solda, seletiva, empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;  
Os fatores mecânicos – sob tensão, fadiga, atrito, associada à erosão;  
Meio corrosivo – atmosférica, pelo solo, induzida por microrganismos, pela água do mar e por sais fundidos.

### 3.3.1 Características fundamentais de diferentes formas de corrosão.

Na literatura são encontradas definições para inúmeros formatos de degradação dos metais, das quais são frequentemente citadas as corrosões:

Uniformes: que ocorre a deterioração de toda a superfície do material à exceção de um ataque restrito em uma posição específico, dano uniforme da espessura. Essa nomenclatura torna-se não usual devido a possíveis subclassificações, como a corrosão alveolar generalizada ou por pites (AHMAD, 2016). Figura 1.

Figura 1: Corrosão uniforme



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Por placas: Trata-se de um tipo de desgaste localizado no qual há a formação de placas com escavações resultante do deslocamento, no qual se desgastam gradualmente da superfície (FERNANDES; MATERNDAL, 2017). Figura 2.

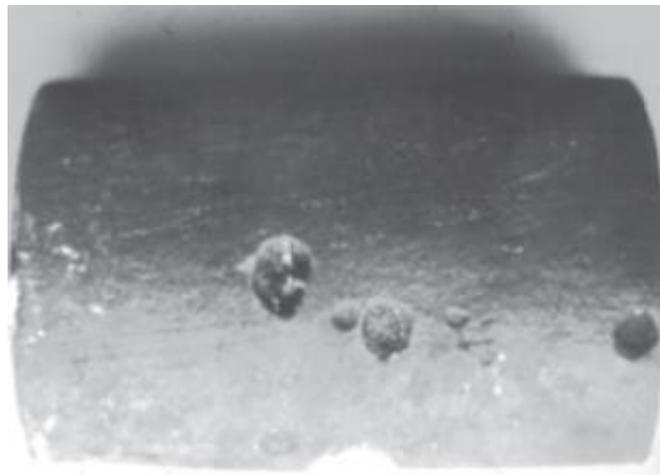
Figura 2: Corrosão por placas



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Alveolar: Desgaste da superfície metálica que ocasiona a formação de sulcos, seja escavações congêneres a alvéolos que desenvolvem fundos arredondados com cavidades inferiores ao seu diâmetro (ARAUJO, 2012). Figura 3.

Figura 3: Corrosão alveolar



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Puntiforme ou por pite: Verifica-se que a corrosão ocorre pequenas regiões localizadas sobre superfície do material originando a formação de pites, cavidades que demonstram o fundo em formato anguloso e profundidade superior a seu diâmetro (GENTIL, 2022). Figura 4.

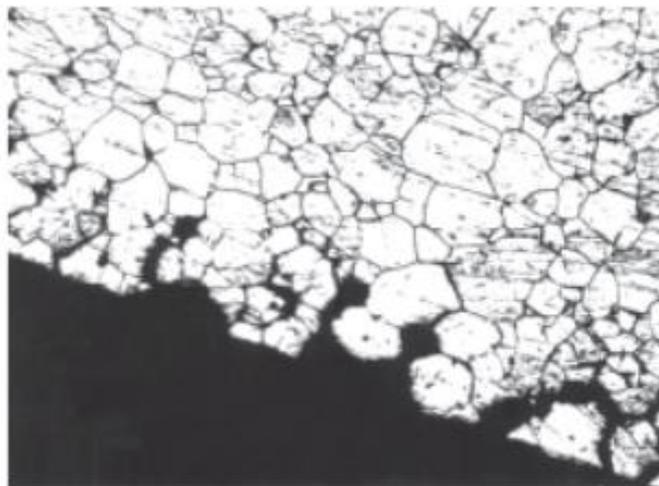
Figura 4: Corrosão por pite



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Intergranular: Diz respeito ao ataque corrosivo por toda a extensão dos contornos de grão da rede cristalina do metal. Este meio é caracterizado como forma de ataque localizado nos limites dos grãos, no qual resulta no decréscimo da resistência e ductilidade (AHMAD, 2016). Figura 5.

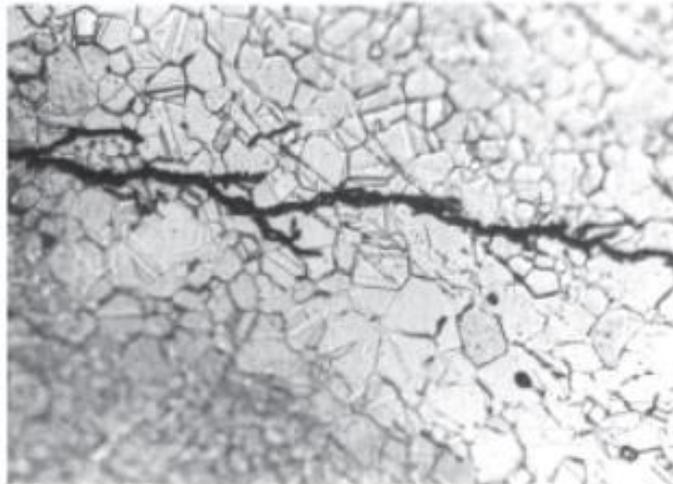
Figura 5: Corrosão intergranular



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Intragranular ou Transgranular: Decorre nos grãos da rede cristalina do material metálico, limitando suas propriedades mecânicas, suscitando menores esforços para a fratura, havendo também a redução da resistência e ductilidade semelhante ao caso de corrosão intergranular, porém com seu potencial de falha superior (ARAUJO, 2012). Figura 6.

Figura 6: Corrosão intragranular



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Filiforme: A corrosão dá-se no formato de finos filamentos não profundos, que crescem em direções distintas devido ao produto de corrosão em estado coloidal, que dispõe de cargas positivas, e conseqüentemente, há a repulsão. Verifica-se comumente em superfícies revestidas com metais ou composições químicas. Por consequência deste processo, identifica-se alterações no revestimento (GENTIL, 2022). Figura 7.

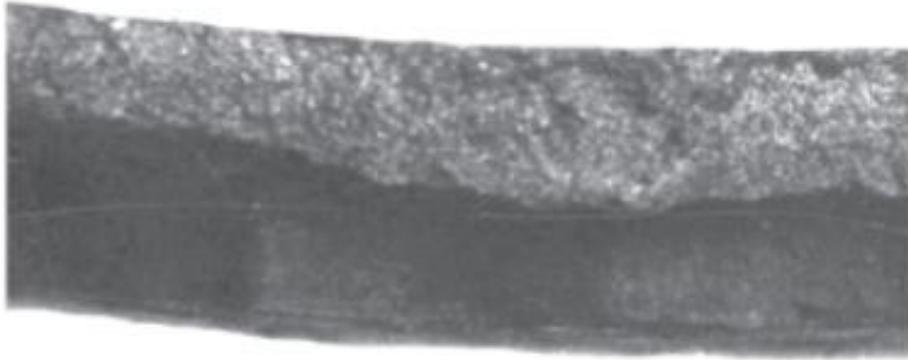
Figura 7: Corrosão filiforme



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Corrosão gráfitica: Este tipo transcorre nos ferros fundidos cinzentos no qual, o fator resultante da dissolução seletiva em água é a aparição de flocos de grafita interconectados juntamente a um produto de corrosão (ASKELAND; WRIGHT, 2019). Figura 8.

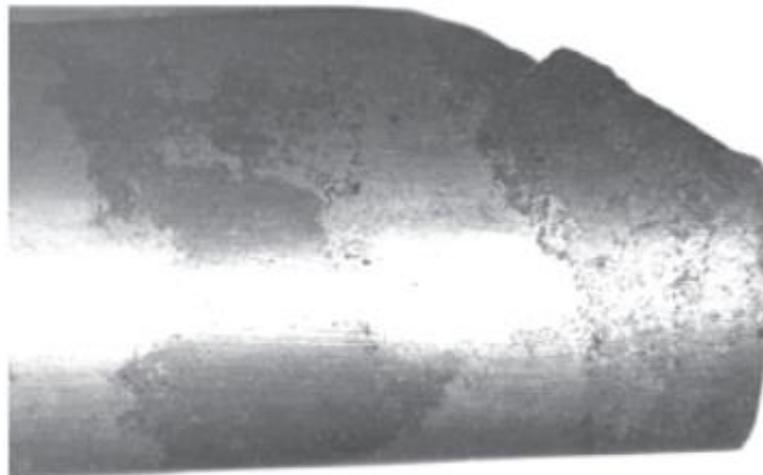
Figura 8: Corrosão gráfrica



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Dezincificação: É o processo que ocorre unicamente em ligas de latão que possuam em sua composição valores superiores a 15% de Zn. Os elementos cobre e zinco são resolto em meios aquosos com devido a altas taxas de temperatura, em que os íons de cobre são depositados no latão, enquanto os íons de zinco não se alteram, permanecendo na solução. O resultado desta reação é o aparecimento de regiões de coloração avermelhada em contraste com ao amarelo típico dos latões. A interpretação nos diz que ocorre corrosão prioritária do zinco, ressaltando a coloração avermelhada do cobre (RUCHERT, 2014). Figura 9.

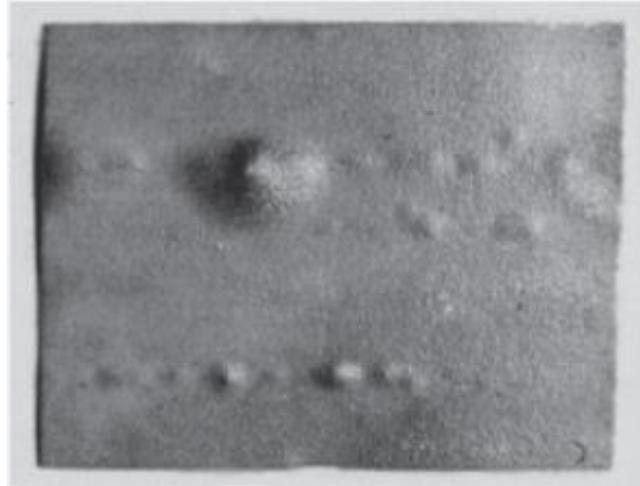
Figura 9: Corrosão por Dezincificação



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Empolamento por hidrogênio: A corrosão ocasionada através do empolamento por hidrogênio é resultado da penetração de moléculas  $H_2$  no material metálico provocando a difusão imediata em regiões de descontinuidades, desempenhando pressão e a formação de bolhas de hidrogênio sobre o contorno de grão, enfraquecendo toda a estrutura (RUCHERT, 2014). Figura 10.

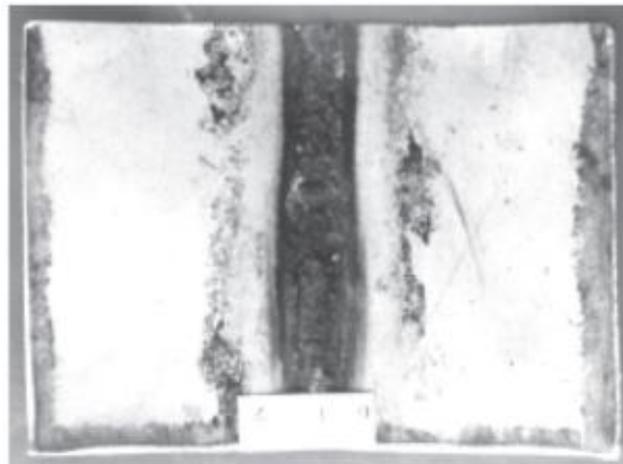
Figura 10: Corrosão empolamento por hidrogênio



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Em torno do cordão de solda: Forma de corrosão que é observado em aços inoxidáveis não estabilizados ou com teores de carbono superiores a 0,03%, onde a corrosão se processa de forma intergranular(GENTIL, 2022). Figura 11.

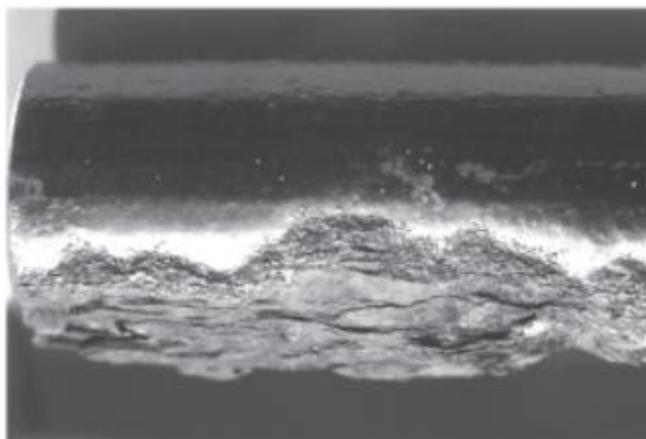
Figura 11: Corrosão em torno do cordão de solda



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Por esfoliação: Processo que se manifesta paralelamente à superfície, resultante do alongamento ou achatamento de grãos estruturais, no qual permite o desenvolvimento de inclusões e segregações, que devido aos trabalhos mecânicos, se convertem em plaquetas alongadas (SODERO, 2020). Figura 12.

Figura 12: Corrosão por esfoliação



Fonte: Adaptada de (GENTIL, 2022)

Para fins comparativos, pode-se afirmar que as formas localizadas como, alveolar, puntiforme, intergranular e intragranular são mais prejudiciais aos equipamentos. Visto que a perda de carga para estes casos seja baixa, há a presença de perfurações ou fraturas que surgem em um intervalo de tempo reduzido. A identificação das medidas corrosivas, como na Figura 1, permite uma avaliação do sistema, com finalidade de aplicação de meios inibidores (GENTIL, 2022).

### 3.4 Tipos de Inibidores

Existem variados métodos de combate à corrosão, no qual o uso de inibidores evidencia-se. Este meio pode ser derivado de apenas uma substância ou combinações que, com devido manuseios e aplicação adequada, tem potencial de reduzir ou eliminar a corrosão. Considerado um dos melhores métodos para proteção contra corrosão, há um estímulo para novas pesquisas, desenvolvimento e inovações de compostos para este propósito (ROMUALDO, 2012).

O desempenho dos inibidores está relacionado à composição de camada ou filme exterior do material, retardando as reações de corrosão. Estes meios podem ser classificados

em suas principais formas: anódicos, catódicos, formadores de filme orgânico (MAINIER; SILVA, 2004).

Há duas classificações mais empregues hodiernamente, no qual é dito que para as reações químicas, são intitulados os inibidores orgânicos e inorgânicos, e para as reações que são induzidas na interface do metal, os inibidores anódicos, catódicos e mistos (BUENO, 2008).

Os inibidores formadores de película são compostos que têm a propriedade capaz de formar películas por adsorção à superfície metálica, criando um filme simultaneamente sobre as áreas anódicas e catódicas, impedindo assim a ação do meio sobre o metal (ABRACO, 2015).

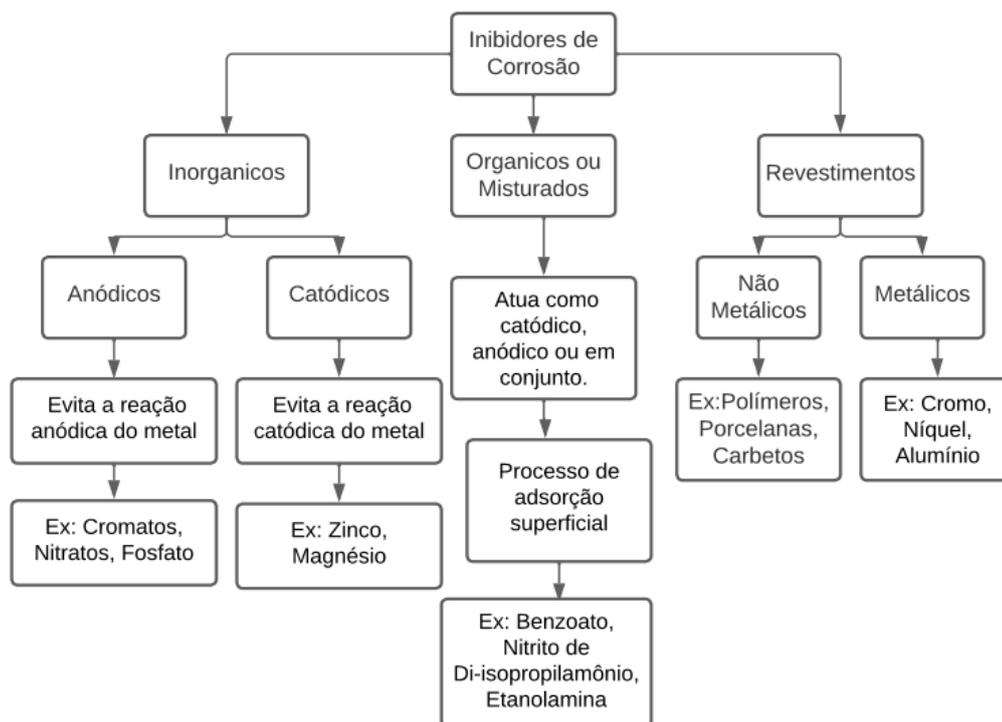
O equilíbrio entre a eficiência e o custo-benefício da aplicação dos inibidores tem correlação direta com alguns fatores. É preciso ter em conta a identificação da causa raiz do desgaste no sistema, assim como verificar a compatibilidade entre inibidor e metal. Todo esse procedimento tem o poder de influência sobre a vida útil, alterações negativas nas propriedades mecânicas, prevenção de acidentes e a redução de manutenções corretivas. Pode-se ainda manusear aspectos visuais da superfície e impedir a contaminação por contato de outros produtos (LIMA, 2015).

### **3.5 Classificação dos inibidores**

A classificação dos inibidores é feita baseado em sua composição química e seu comportamento. Os recursos e a metodologia do processo envolvem de modo geral os revestimentos, os inibidores de corrosão, e não menos importante, as técnicas de modificação do meio e proteção catódica – anódica (FRAUCHES-SANTOS et al., 2014).

De acordo com a Figura 13, é possível identificar a classificação e suas subdivisões de inibidores de corrosão para aplicações em aços variados, e por conseguinte, suas especificações.

Figura 13: Fluxograma das classificações de inibidores de corrosão



Fonte: Adaptada de (FRAUCHES-SANTOS et al, 2014; GENTIL, 2022).

### 3.5.1 Inibidores Anódicos

Inibidores anódicos possuem a capacidade de reajustar e conter as reações na superfície metálica através da formação de um filme de óxido protetor por aplicação de corrente anódica externa, que adere sobre a superfície do metal, ocasionando o efeito de interrupção da reação anódica. A efetivação desse processo se dá pela interação do inibidor com o seguimento da corrosão em seu princípio, que durante este processo, concebem óxidos ou hidróxidos, e podem particularmente dispor a característica de um oxidante, da forma que o cromato e o nitrito apresentam (MYRDAL, 2010; GENTIL, 2003).

De acordo com o estudo feito por Myrdal (2010), a ação dos inibidores anódicos aumenta o potencial da região, portanto, as curvas anódicas e catódicas se interceptam com uma menor corrente e maior potencial de corrosão, proferindo com que os efeitos desses inibidores na reação catódica são desprezíveis.

Outrossim, é encontrado os não oxidantes, do mesmo modo que os molibdatos, boratos, vanadatos e tungstatos, que diminuem a corrente crítica para a passivação do sistema ao aderir em sua superfície. Recomenda-se que utilize uma alta concentração do inibidor anódico de modo que a densidade de corrente catódica no primeiro potencial de passivação

seja maior que a densidade de corrente anódica crítica. O não cumprimento destes fatores podem originar-se maiores efeitos negativos que em sua ausência, como por exemplo, a corrosão por pite (FERNANDES, 2016).

### 3.5.2 Inibidores Catódicos

Inibidores catódicos atuam fornecendo íons metálicos por meio da precipitação de sais de baixa solubilidades, que impossibilitam a difusão do oxigênio e o transporte de íons, atuando em combate à corrosão. Este inibidor induz um aumento de impedância da superfície, polarizando e sucedendo na concepção de uma película sobre superfície. Este método tem também como característica uma forte recepção de prótons de veemência apta a anular as correntes de corrosão das diversas pilhas existentes na superfície metálica. Entretanto, para reações anódicas a sua eficácia é inferior (KODAMA; HOTSUMI, 2011).

Falhas durante o processo de revestimento catódico provocam pilhas galvânicas consequente da presença de eletrólitos, que desencadeiam a rápida corrosão do material revestido. Para revestimentos anódicos, não ocorrerá a falha do caso anterior, uma vez que o material de sacrifício do revestimento será o anodo da pilha, desenvolvida em efeito do eletrólito (GENTIL, 2022).

Esta classe de inibidor possibilita uma diminuição indireta da velocidade de reação, consequente da limitação do oxigênio necessário para a reação ou pela precipitação nos locais catódicos da cela eletroquímica (FREIRE, 2005).

### 3.5.3 Revestimentos

Os metais estão sujeitos a degradação desde sua constituição inicial em função da oxidação, à vista disso, é viável obter formas de prolongar a vida útil da liga mediante a aplicações de revestimentos metálicos e não metálicos (SILVA, 2020).

Silva (2010), afirma que a ação protetora do metal pode ser efetuada pelo método de revestimento metálico, que consiste na blindagem da superfície do metal, em que se utiliza como base a formação de películas protetoras de óxidos, hidróxidos e outros compostos aderentes oriundo de metais de sacrifício, que resistem aos oxidantes do meio corrosivo. Alguns exemplares de metais de sacrifício são comumente utilizados são o alumínio, cromo, níquel e zinco (SILVA, 2020).

O metal é depositado ainda em sua forma líquida sobre a superfície, onde ocorre a solidificação produzindo uma camada com poros parciais de lâminas que se concentram para maximizar a resistência à corrosão (FRAUCHES-SANTOS et al., 2014).

É esperado que a película se adere e impermeabilize corretamente os variados revestimentos que possuem função catódica para impedir a formação de pilhas galvânicas. Esta aplicação pode ser feita pelas técnicas tal quais a cladização, imersão a quente, metalização, eletrodeposição, cementação, deposição em fase gasosa, e por redução química (OLIVEIRA, 2012).

Os revestimentos não-metálicos inorgânicos são proporcionados pela deposição de compostos inorgânicos sobre a superfície diretamente, das quais os involutórios contra a corrosão englobam o manuseio de esmaltes vitrosos, vidros, porcelanas, cimentos, óxidos, carbetos, nitretos, boretos e silicetos (GENTIL, 2022).

Por ser economicamente viável e apresentar durabilidade e eficácia aceitável, permitindo o seu uso e reparação em largas escalas. Os revestimentos não-metálicos como as tintas denotam uma maior desenvoltura para manutenção. Genericamente, as tintas possuem composição química viscosa, e por consequência, compondo uma película aderente e opaca protetoras sobre a superfície em questão (SILVA, 2020).

### 3.6 Taxa de corrosão

A degradação e perda de massa do material em consequência da reação química é um parâmetro pertinente de corrosão, esse fator é descrito na literatura como a taxa de penetração da corrosão (TCP) por unidade de tempo (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). A formulação descrita por Callister (2016) é dada pelo equacionamento abaixo, em função da perda de peso (W), massa específica ( $\rho$ ), área (A) e tempo de exposição (t) das amostras.

$$TCP = \frac{KW}{\rho At} \quad (1.1)$$

A constante K possui valor adimensional e deve ser empregue de acordo com as unidades dos dados de entrada, sendo  $K = 534$  para obtenção do resultado em mils por ano (mpa), em que W,  $\rho$ , A e t devem ser especificados respectivamente em unidades de miligrama, gramas por centímetro cúbico, polegada quadrada e horas. Para a consecução do valor final em milímetros por ano (mm/ano), considera-se  $K = 87,6$  e as unidades semelhantes

ao primeiro caso, exceto pela variável A que deve ser imposta em centímetros quadrado (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

A norma NACE RP-0775 (2005) rege as informações no qual se diz respeito à preparação das superfícies, tal como o formulário para os cálculos para estimativa da taxa de corrosão. Outrossim, a norma NACE Standard TM-01-69 (2021) incluem fatores como solução de teste, temperatura, movimento do fluido, volume da solução e cálculo de taxas de corrosão.

Callister (2016) ainda afirma que, para valores de taxa de penetração da corrosão, são aceitáveis valores inferiores à 0,50 mm/ano ou 20 mpa, valores acima destes são classificados como severos e não recomendados para uso nestas condições.

### 3.7 Aços microligados

Os aços microligados são amplamente reconhecidos em função de sua polivalência e propriedades superiores, que está diretamente relacionada com o aprimoramento de suas composições ocasionada pelo decréscimo da inclusão de carbono e baixos teores de elementos de liga, originando-se o renomado subgrupo de aços de alta resistência mecânica e baixa liga (ARBL), ou *high strength low alloy* (HSLA) (TOFFOLO, 2008).

Há uma vasta gama de tipos de aços, nos quais podem ser classificados pela sua quantidade de carbono, composição química, microestrutura e sua aplicação. Para isso, criaram-se órgãos para efeito de normalização e controle destes parâmetros, ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), a SAE (Society Automotive Engineers) e a ASTM (American Society for Testing and Materials), dentre outros sistemas que vem suprimindo as premissas (SANTOS, 2011).

Estes aços são empregues para as confecções destinadas à sistemas que exige esforços extremos, podem ser classificados em dois subconjuntos em referência aos valores de propriedade mecânica, como aços de resistência moderada ou normal e os aços de alta resistência. O subconjunto primário é distribuído em aços de classes A, B, C, D e E à proporção dos valores da tenacidade. O seguinte apresenta as classes AH, DH, EH e FH em consonância com os valores de tenacidade seguidamente aos dígitos 32, 36, 40, conforme os valores de limite de escoamento em décimos de MPa (RIBEIRO, 2015), sendo os aços comuns mais usados, o AH32, DH32, AH36, DH36, AH40 e DH40. Na Engenharia Naval, mais de 90% do material utilizado em aplicações marítimas é integrada por aços (SANTOS, 2011).

Uma análise elaborada por SHOW et al. (2010), informa que os aços microligados alcançam a mesma resistência comparados à aços carbonos comuns sem necessariamente passar pela mesma quantidade de processos a frio, induzindo uma maior ductilidade. Aços microligados trabalhados a quente, com aplicação de um resfriamento adequado durante sua manufatura, pode alcançar as propriedades mecânicas e a excelente soldabilidade equivalentes à aços provenientes de um processo de tempera ou revenimento.

De acordo com a análise feita por Pannoni (2002), estes materiais são desenvolvidos em sua grande parte com base nos aços de baixo carbono como o ASTM – A36, que com a adição de quantidades inferiores a 2% de elementos como Manganês e outros elementos em baixa quantidade, podem entregar uma redução de custo para projeto, tanto em quantidade de material, quanto financeiramente. Os fatores indispensáveis e diferenciais dos aços microligados são a ductilidade e homogeneidade, seu valor elevado entre limite de resistência e limite de escoamento, a excelente soldabilidade devido ao baixo teor de carbono, susceptibilidade de corte por chama sem o endurecimento do material e a satisfatória resistência a corrosão.

### 3.7.1 Aço AH36

Classificado como aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), o aço AH36 ostenta grande capacidade de desenvolvimento para a indústria naval, utilizado em cascos de navios e plataformas, com ótimas qualidades em função da correspondência entre a microestrutura e as propriedades mecânicas, objetivando a incrementação da resistência, tenacidade, comportamento satisfatório referente corrosões severas, facilidade para conformação e propriedades de soldagem (RODRIGUES et al., 2013).

Durante o processo de obtenção do aço AH36, regido pela norma ASTM A 131/A 131M, há um refino de grão por meio do endurecimento por precipitação alcançado pela formação de carbonetos de vanádio, nióbio e titânio, elevando o limite de escoamento desta liga conforme a redução do teor de carbono e o acréscimo no teor de manganês, o que deriva no decréscimo em peso de aproximadamente 30% (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982). As Tabelas 1 e 2 evidenciam os valores máximos da composição química e as propriedades médias desta liga.

Tabela 1: Composição química dos AH36 determinada pela norma ASTM A131

<b>Elemento</b>	<b>Aço A36 (%)</b>	<b>ASTM A131 (%)</b>
C	0,15292	0,18
Si	0,21612	0,10 – 0,50
S	0,00048	0,035
P	0,01259	0,035
Mn	1,09280	0,90 – 1,60
Ni	0,03387	0,40
Cr	0,02010	0,20
Mo	0,00668	0,08
V	0,00695	0,05 – 0,10
Cu	0,01365	0,35
W	0,00000	-
Ti	0,01396	0,02
Sn	0,00166	-
Al	0,03700	0,015
Nb	0,00971	0,02 – 0,05

Fonte: Adaptada de Ribeiro et al. (2013).

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço AH36 determinada pela norma ASTM A131

<b>Especificações ASTM</b>	<b>Grau</b>	<b>Limite de Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento em 200 mm (%)</b>	<b>Alongamento mínimo em 50 mm (%)</b>
A 131	AH36	490-620	355	19	22

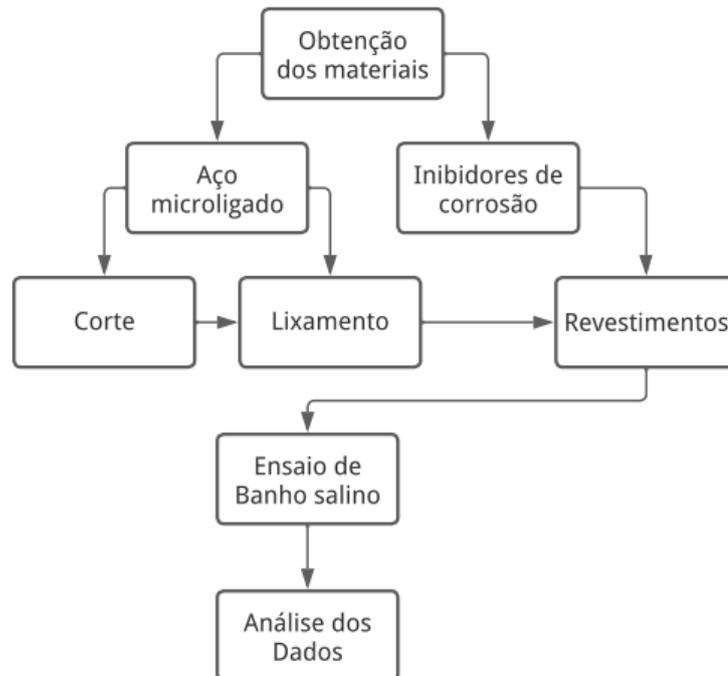
Fonte: Adaptada de Ribeiro et al. (2013).

Para efeito de comparação entre as microestruturas e propriedades do aço ASTM A36, ambos correspondem a instâncias de usabilidade em até -40°C, como em casos de navegações em situações extremas. Há um grande ganho em propriedades nas quais são excepcionalmente usuais, como o aumento da tenacidade do material, à semelhança da soldabilidade e a derivação do peso do metal com a diminuição do teor de carbono. Isto resulta no aumento do valor de mercado do aço AH36 em proporção a seu potencial (CARLESSO et al., 2018).

#### 4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, vale ressaltar que a caracterização dos materiais, equipamentos e metodologia empregue na execução projeto, é mostrado na Figura 14. Inicia-se a pela posse dos materiais, sendo eles a chapa de aço e insumos para o revestimento superficial. Posteriormente, a preparação dos corpos de prova, para possibilitar a aplicação da película anticorrosiva, sucedido do ensaio de imersão em banho salino o ensaio de nevoa salina juntamente a análise dos efeitos decorrentes deste processo.

Figura 14: Fluxograma metodológico do processo



Fonte: Autoria própria.

#### 4.1 Materiais utilizados

Para o estudo foi optado pela utilização do aço microligado AH36 comumente empregue para construção naval que, tratando-se de um aço de alta resistência e baixa liga, apresenta excelentes propriedades para ambientações onde estão predispostos à grandes esforços. Este foi disponibilizado em formato de barra.

Foram selecionadas três classes de revestimentos apropriados para aplicação no material base, adquiridos comercialmente e com parceria da Universidade Federal da Grande Dourados, dentre os quais foram selecionados a galvanização a frio do tipo spray cinza fosco (CRZ), tinta spray branco brilhante (Color Jet) e Primer Universal (Maxi Rubber) + tinta spray preto brilhante (Colore), evidenciados na Figura 15. A escolha destes meios de proteção foi efetuada com base no custo-benefício, acessibilidade e efetividade disponíveis no mercado para combate à corrosão dos metais .

Figura 15: Revestimentos utilizados



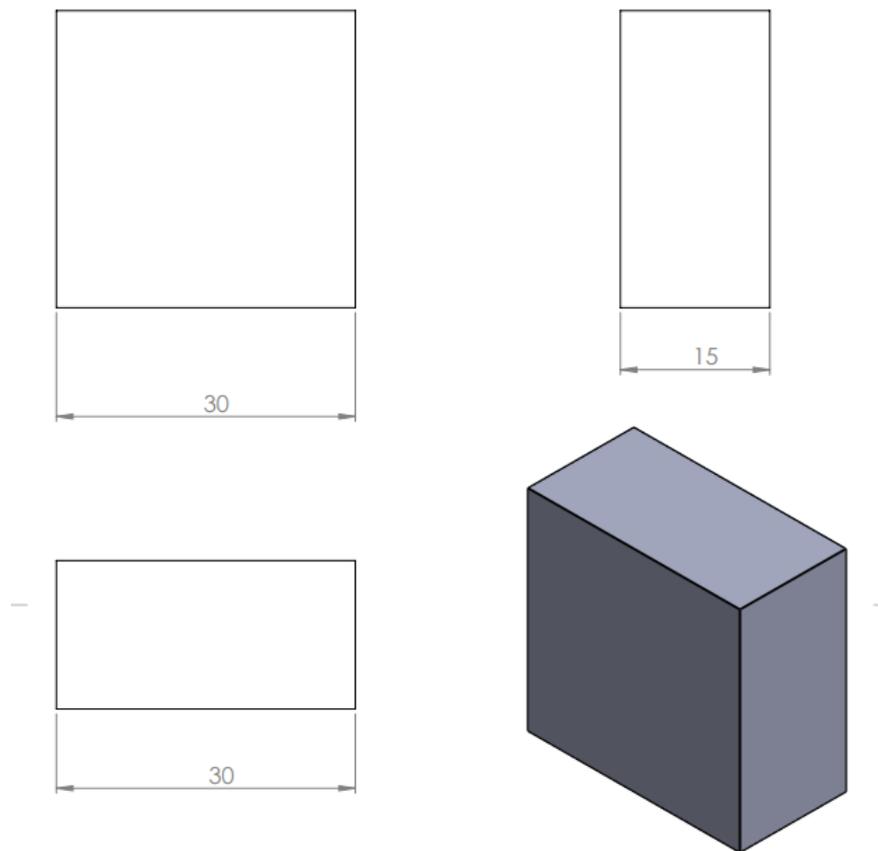
Fonte: Autoria própria.

## 4.2 Preparação das amostras

### 4.2.1 Corte

Para a confecção das amostras em AH36 foi utilizado chapas do aço em 15 mm de espessura, cortadas em formato retangular. A Figura 16 expõe os parâmetros geométricos dos corpos de prova.

Figura 16: Ilustração das amostras

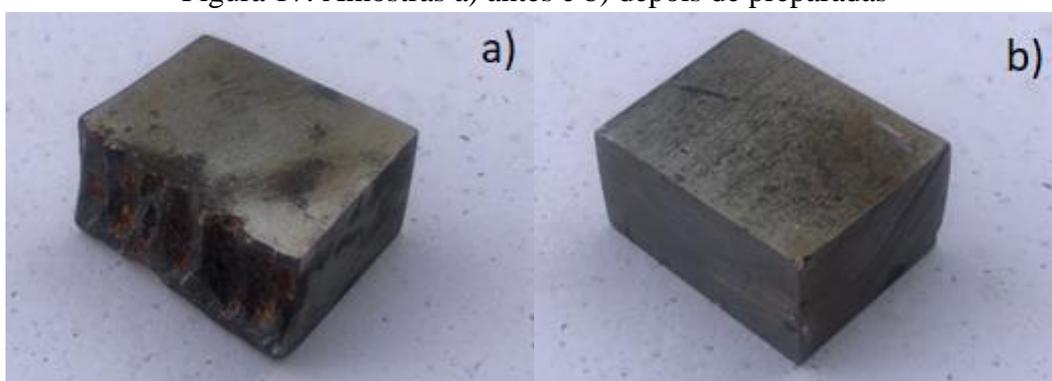


Fonte: Autoria própria.

Por tratar-se de um aço de alta resistência mecânica, o recorte das amostras foi feito por meio de uma esmerilhadeira de 2600W com o disco de corte de 7" específico para aços, visando o não superaquecimento do material que pode acarretar eventuais alterações mecânicas e metalográficas do metal. Vale ressaltar que, por se tratar de um corte feito manualmente, pode resultar em algumas deformidades, que não influenciam nos resultados para este estudo em específico.

A superfícies dos corpos de prova quando expostas ao oxigênio estão sujeitas à oxidação. Portanto, aplicou-se um lixamento com o objetivo de limpeza e manuseio de rugosidade para o processo de revestimento. Para esta metodologia foram utilizados três granulometria de lixas: 80, 320 e 600 respectivamente. É recomendado operá-las com movimentos regulares, havendo progressão das lixas quando obtido uma uniformidade razoável da superfície. Essa progressão foi prestada de modo que, para cada lixa, o corpo de prova foi girado 90° em referência à sua face em trabalho, conforme a Figura 17.

Figura 17: Amostras a) antes e b) depois de preparadas



Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.2 Inibidores

Os métodos utilizados para cada inibidor foram baseados nas recomendações de uso localizada em seus rótulos, adotando como padrão a passada de três demãos com intervalos de 30 min cada. A total secagem foi realizada de forma natural, exposta ao ar ambiente. A Tabela 3 apresenta a organização e identificação dos componentes, assim como a associação a seus revestimentos e tempo em que serão submetidos ao ensaio.

Tabela 3: Organização e planejamento para os períodos de teste

<b>Método</b>	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>
Sem proteção	C_1.1	C_1.2
Tinta spray	C_2.1	C_2.2
Galvanização a Frio	C_3.1	C_3.2
Primer Pu + Tinta spray	C_4.1	C_4.2
<b>Tempo total de ensaio:</b>	3 dias	7 dias

Fonte: Autoria própria.

As amostras foram ordenadas em pares conforme cada categoria de revestimento e o período do tempo de ensaio, sendo três pares aplicáveis para os inibidores, e um não aplicável com sua superfície integralmente exposta. Apesar do processo ser feito de forma manual, é necessário que a aplicação dos revestimentos seja feita o mais homogêneo possível

Para a galvanização a frio e a tinta metálica, foi utilizada a mesma metodologia de aplicação, sendo ela depositar sobre a superfície do corpo de prova três camadas do conteúdo pelo método de spray com intervalos de 30 min para cada demão, e com o tempo de secagem total de 2 dias.

O processo de aplicação do Primer Pu universal foi baseado nas recomendações prescritas no site do fabricante MAXI RUBBER, 2022. A sistematização ressalta o manuseio da superfície do metal antes da sua aplicação, recomendando o uso de lixas de granulometria acima de 220 para a preparação da superfície, e após o lixamento retirar todo o contaminante do sistema. É imprescindível que seja feita uma relação de mistura de 100 partes de Primer Pu para 100 partes de solvente thinner (relação de 1/1) para o enchimento, no qual foi empregue um compressor de 40 lbs/pol<sup>2</sup> de pressão e uma pistola convencional com bico de 2.0 mm, recomendado para este tipo de procedimento. Posteriormente às três demãos e a secagem total, aplicou-se um lixamento com uma lixa de grão 320 seguidamente a sobreposição da tinta metálica para acabamento da peça.

Com todas as amostras finalizadas, sucedeu-se a pesagem de cada unidade antecipadamente ao ensaio, mostrado na Tabela 4, visto que a variação da massa é o parâmetro utilizado para observar a taxa de corrosão exercida sobre o material em teste.

Tabela 4: Massa total das amostras antes do início do ensaio

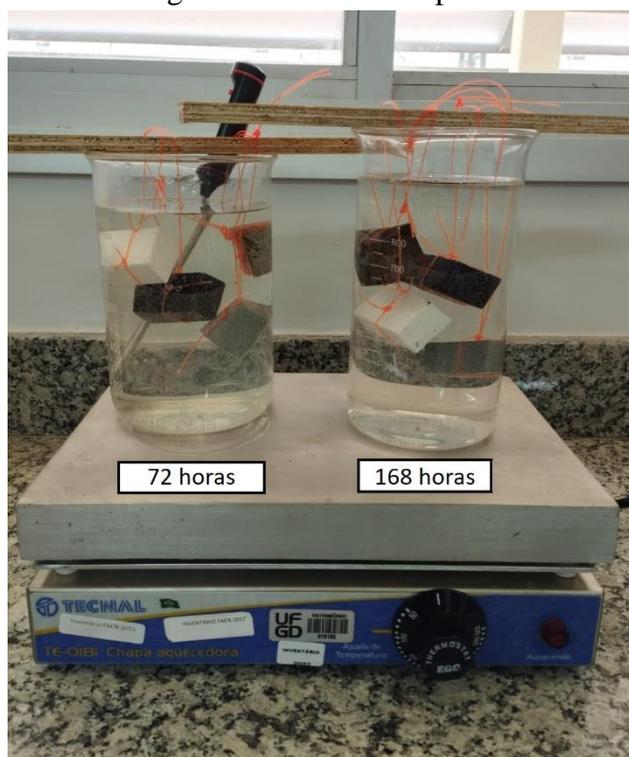
<b>Revestimento</b>	<b>3 dias (g)</b>	<b>7 dias (g)</b>
<b>Sem revestimento</b>	164,32	157,41
<b>Tinta spray</b>	141,49	139,55
<b>Galvanização</b>	151,23	140,85
<b>Primer Pu + Tinta spray</b>	135,58	132,70

Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.3 Ensaio de ataque corrosivo

O ensaio de ataque de banho salino parte do princípio do mecanismo de exposição direta do metal revestido à nevoa salina, entretanto adaptou-se o sistema para este estudo, adentrando totalmente as amostras na solução (Figura 18).

Figura 18: Sistema adaptado



Fonte: Autoria própria

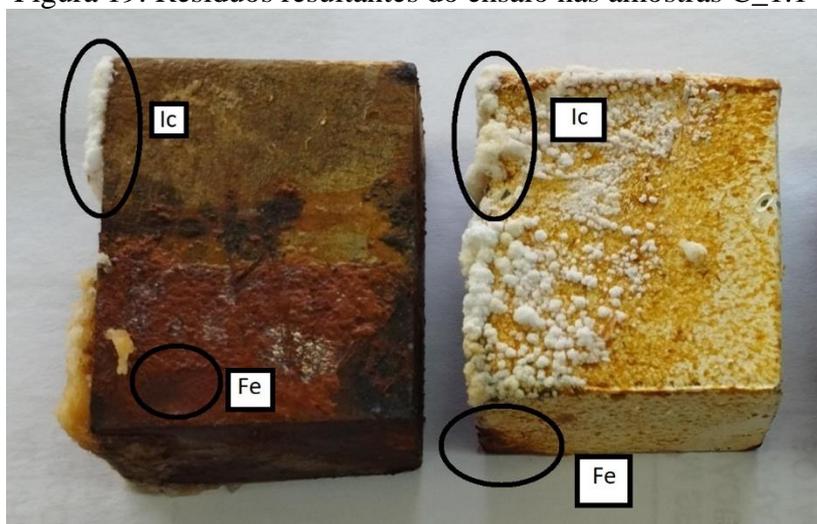
Para o ensaio, foi utilizado a mistura de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) em proporção de 5% para cada litro de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), simulando uma atmosfera marinha. Foi utilizado dois Bekers com capacidade de 1L cada, no qual as amostras foram submersas totalmente na solução.

Para efeitos de fixação, os corpos de prova foram envolvidos por fio de nylon e amarrados em um espécime de varal de madeira, mantendo equilíbrio e espaçamento adequado para que não haja contato entre si, fator que pode ocasionar alterações durante o experimento. Em seguida, os bekers foram levados à chapa aquecedora modelo TE -0181, de modo que, foi mantida a temperatura do sistema de modo harmônico em torno de  $50^\circ\text{C} \pm 1,9^\circ\text{C}$ , onde houve um acompanhamento diário para controle de temperatura e substituição da solução. Esta metodologia seguiu-se por 3 dias para a primeira leva das amostras e 7 dias para a segunda, nos quais foram retiradas respectivamente para a análise.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao término do ensaio, notou-se que as amostras C\_1.1, C\_2.1, C\_1.2, C\_2.2 em específico apresentaram incrustações de cloreto de sódio em suas superfícies. A retirada desses resíduos foi feita com água corrente e um escovamento suave, procedimento realizado em todas as peças. Em seguida, foram separadas com a identificação concernente ao tempo e a nomenclatura de cada uma delas. A Figura 19, mostra parte dessas impurezas resultantes do processo, sendo elas a incrustação de cloreto (Ic) e óxido de ferro (Fe).

Figura 19: Resíduos resultantes do ensaio nas amostras C\_1.1 e C\_2.1

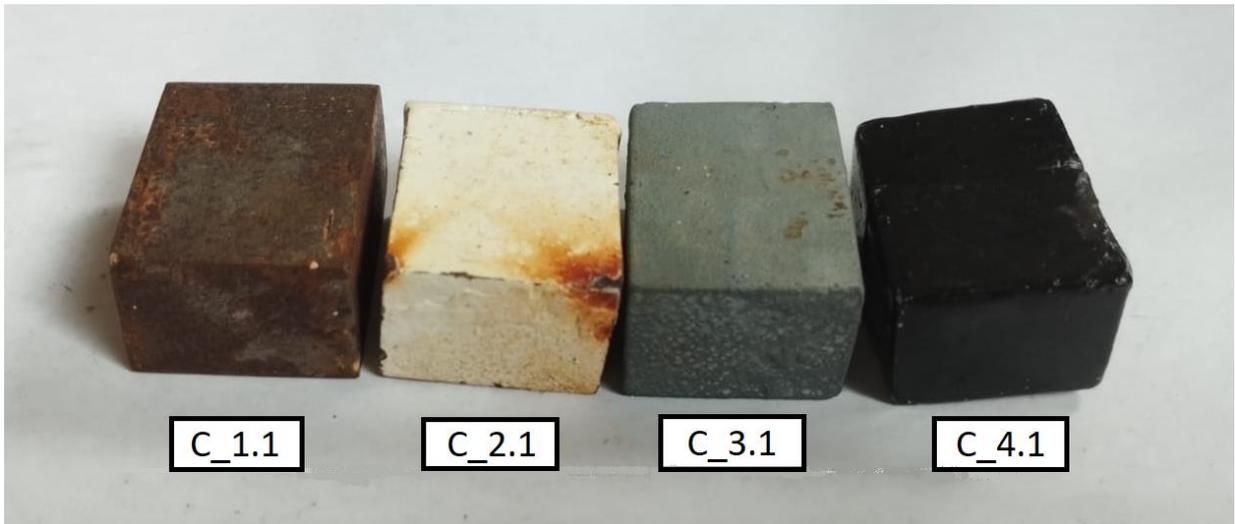


Fonte: Autoria própria.

A incrustação advém dos componentes inorgânicos presentes na água. A precipitação do NaCl, que aderiu à superfície do metal está ligada diretamente à variação de temperatura, assim como o fato o fluido estar totalmente em repouso. Aspectos como a mistura de fluidos incompatíveis, alteração de pressão em consequência do escoamento e equilíbrio químico (aumento do pH por meio da perda de CO<sub>2</sub>) podem ser os maiores contribuintes para a formação de incrustações (VIDAL, 2015).

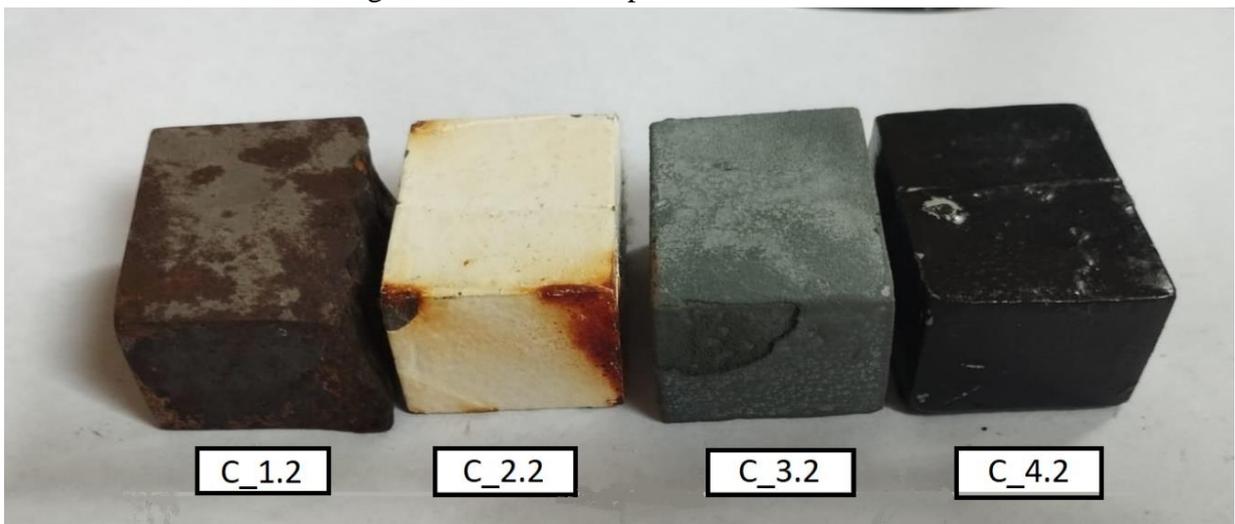
As Figuras 20 e 21 evidenciam as amostras posteriormente ao ensaio e a uma limpeza superficial feita com um escovamento e água corrente, com identificações referentes aos seus respectivos revestimentos.

Figura 20: Amostras após 3 dias de ensaio



Fonte: Autoria própria.

Figura 21: Amostras após 7 dias de ensaio



Fonte: Autoria própria.

É perceptível que o rompimento das películas ocorreu nas regiões de cantos vivos, pois trata-se de locais concentradores de tensão, e pontos propícios para o início do processo de corrosão.

## 5.1 Cálculo da taxa de corrosão

A Tabela 5, evidência a perda de massa dos corpos de prova no decorrer do período no qual foram submetidos ao teste. A tabela completa referente às massas antes e depois do ensaio está anexada no Apêndice A.

Tabela 5: Perda de massa

<b>Revestimento</b>	<b>3 dias (g)</b>	<b>7 dias (g)</b>
<b>Sem revestimento</b>	10,89	13,78
<b>Tinta spray</b>	6,27	8,14
<b>Galvanização</b>	1,16	3,55
<b>Primer Pu + Tinta spray</b>	0,36	0,78

Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que, a área das superfícies das amostras é de 36 cm<sup>2</sup>, e que a constante operada para a determinação da taxa de corrosão é a de  $K = 87,6$ . Essa premissa permite alcançar o valor de penetração no material em mm/ano, por meio da equação (1.1). A Tabela 6 a seguir mostra a taxa de corrosão sofrida pelos corpos prova destacando-se pelo tempo e tipo de revestimento.

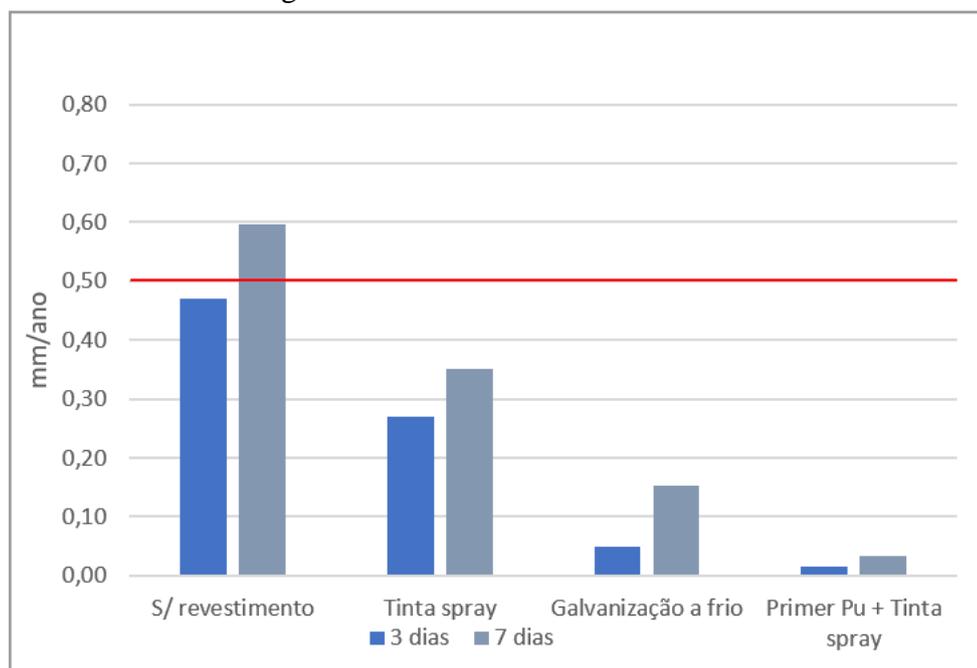
Tabela 6: Taxa de corrosão

<b>Revestimento</b>	<b>72 horas (mm/ano)</b>	<b>168 horas (mm/ano)</b>
<b>Sem revestimento</b>	0,47	0,60
<b>Tinta spray</b>	0,27	0,35
<b>Galvanização</b>	0,05	0,15
<b>Primer Pu + Tinta spray</b>	0,02	0,03

Fonte: Autoria própria.

Por meio destes dados, foi possível gerar um gráfico para facilitar a visualização para efeitos de comparação entre o período e procedimento conforme correspondente a Figura 22.

Figura 22: Gráfico da taxa de corrosão

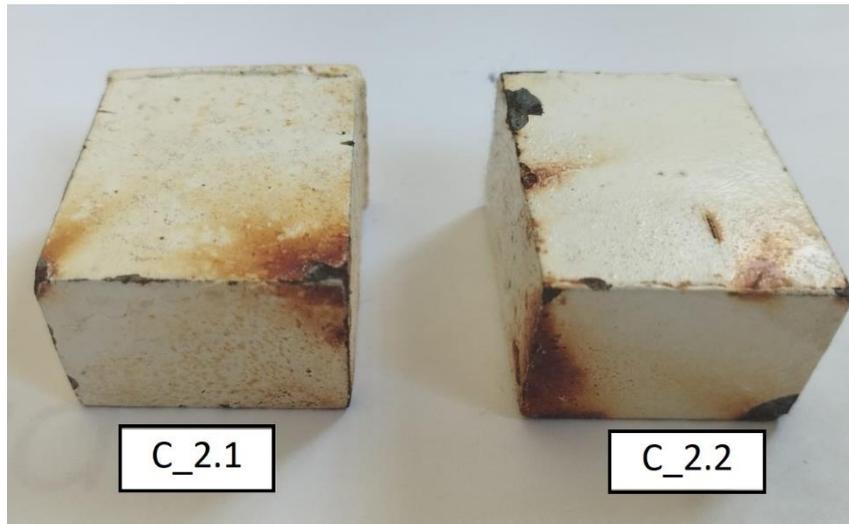


Fonte: Autoria própria.

Visto que a taxa de corrosão aceitável pela norma NACE RP-07-75 de até 0,50 mm/ano, é possível fazer uma análise comparativa considerando as condições semelhantes às ambientações marítimas reais nas quais as amostras foram submetidas, e seus respectivos processos. Em concordância com a Figura 22, observa-se que para as amostras sem revestimentos, os valores das taxas se mantiveram em conformidade com a norma para a amostra C\_1.1 de aproximadamente 5,85% e um desgaste superior ao aceitável de cerca de 19,14% para a C\_1.2, respectivamente a 72 horas e 168 horas de submissão.

As amostras revestidas por tinta spray demonstraram comportamentos, nos quais ambas apresentaram resultados satisfatórios para seu período de teste com uma margem de eficiência à corrosão de 45,79% para a amostra C\_2.1. Já para a amostra C\_2.2 houve um decréscimo em sua efetividade que atingiu 29,62%. Para os dois casos houve rompimento de suas películas durante o ataque, com princípios localizados nos cantos vivos, conforme a Figura 23, expondo diretamente o metal à solução.

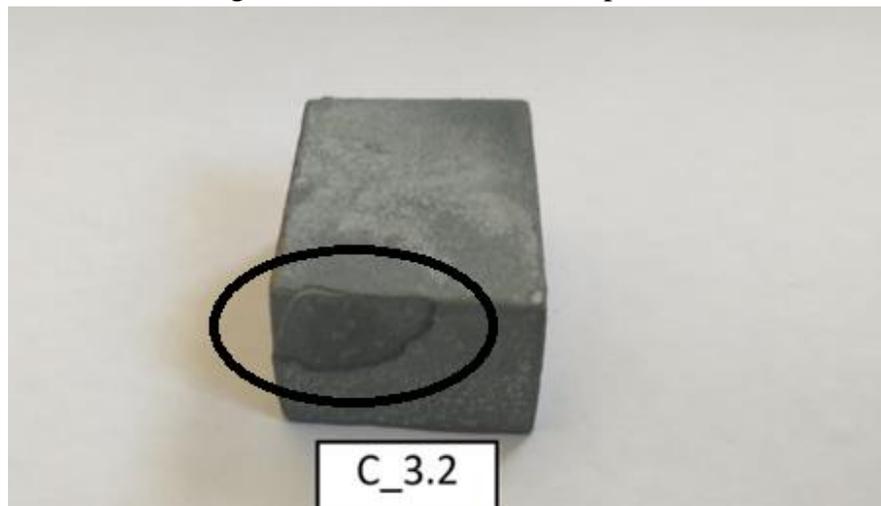
Figura 23: Rompimento da Película



Fonte: Autoria própria.

Ambas as peças blindadas pela galvanização a frio manifestaram um bom comportamento, onde obtiveram em comparação às amostras sem revestimento, um aumento de 89,97% para C\_3.1 e 69,30% para C\_3.2 na resistência ao ataque. Entretanto, o segundo corpo de prova iniciou um descascamento de seu revestimento no período final de seu ensaio similarmente oriundo dos cantos vivos da peça, como na Figura 24.

Figura 24: Descascamentos da película



Fonte: Autoria própria.

Esse fator pode ter origem em razão da criação de bolhas entre as camadas do revestimento, presença de impurezas e inexperiência durante o processo de aplicação do

produto, ou por influência da submersão direta das peças em solução, aos quais foram submetidos no ensaio.

O Primer Pu em conjunto a tinta spray entregou um o combate à corrosão sobre o sistema, apresentando ao final do ensaio 96,89% de eficácia em combate à corrosão para a amostra C\_4.1 e 93,26% para C\_4.2. Nesse ínterim, não houve alterações visíveis nas superfícies revestidas. A junção dos dois componentes invólucros atendeu perfeitamente aos requisitos do processo.

## 6 CONCLUSÃO

Fundamentado na análise dos resultados, tem-se que os revestimentos ampliaram a vida útil do Aço ASTM 131 AH36 em combate a corrosão de atmosfera marítima.

Para todos os meios inibidores, foi obtido um aumento na proteção quando comparado ao metal base totalmente exposto, visto que, o cloreto de sódio libera íons em suas superfícies, tornando-o um composto intensamente agressivo e prejudicial para a grande maioria dos metais.

A Tinta spray reduziu o desgaste do material, mas para este caso em específico, não se provou suficiente e adequado para uso, uma vez que se provou o alto desgaste e rompimento de sua película logo nas primeiras 3 dias de ensaio.

As amostras galvanizadas a frio, fundamentalmente designada para combater esta configuração de ataque, apresentou bom desempenho, reduzindo em até 3,26 vezes o desgaste do metal em comparação à amostragem sem revestimento. Posto que, foi verificado descascamento da camada externa do revestimento da amostra C\_3.2, é válido afirmar que este procedimento se mostrou usual para combater corrosões desta natureza.

O Primer Pu + tinta spray obteve o melhor desempenho dentre os citados anteriormente, com uma redução da taxa de corrosão de até 14,83 vezes. Além de promover bom isolamento do metal, assegura uma melhor aderência da tinta para acabamento.

Em síntese, em todos os métodos foi observado uma melhora na resistência contra corrosões, entretanto é proficiente que a distinção seja feita entre a Galvanização a Frio e Primer Pu + Tinta, visto que uma e outra lograram valores interessantes para o combate. As propriedades mecânicas, o meio em que estão em prova e o valor de mercado são os coeficientes que irão distinguir a metodologia compatível para tal finalidade em situações distintasq.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com objetivo de investigar melhor a influência destes meios agressivos com relação as diferentes ligas metálicas, pode-se prosseguir este estudo realizando as seguintes análises:

- Testar outras categorias de revestimentos para aços;
- Simular atmosferas agressivas distintas;
- Aplicar diferentes categorias de ligas metálicas;
- Construir um sistema compacto e seguro para os ensaios.

## 8 REFERÊNCIAS

- ABRACO. **Corrosão- Uma abordagem geral**. Associação Brasileira de Corrosão - ABRACO, p. 1–13, 2015.
- AHMAD, Z. **Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control**. First Edition ed. Burlington, VT: ELSEVIER, 2016. v. vol 1
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM. A131/A131M**. Standard Specification for Structural Steel for Ships, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **E1823-13**. Standard Specification for Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing, 2013,
- ARAÚJO, A. A. DE. **Gerenciamento de Falhas por Corrosão em Dutos**. Rio de Janeiro - RJ: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC RIO, abr. 2012.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. 4<sup>o</sup>ed. ed. São Paulo-Sp, 2019.
- ASM HANDBOOK. **Corrosion**. 9th Edition ed. Colorado: ASM Handbook, 1992.
- BATCHELOR, I. et al. **Materials - Degradation and its Control By Surface Engineering**. 2nd Edition ed. London, 2006.
- BEZERRA, B. F. A. **Análise da Taxa de Desgaste de um revestimento nanométrico WC-CoCr/Ni-Cr depositado por HVOF**. [s.l.] Porto Alegre, nov. 2016.
- BUENO, G. V. DE. **Formulação e otimização de uma mistura de inibidores de corrosão para aço carbono em meio de água de resfriamento industrial usando planejamento estatístico**. São Paulo - SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 9<sup>o</sup>ed ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. vol 1
- CARLESSO, A. L.; BOZETTI, C. S.; MUNIZ, R. P. G. C. **Análise comparativa dos aços astm a131 ah36 e astm a36: um estudo de caso do uso de um aço no piso de módulo para FPSO**. Aracruz: Faculdades Integradas de Aracruz, 21 nov. 2018.

CARVALHO, P. C. **Estudo do comportamento ao desgaste e corrosão dos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 420 depositado pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico.** Recife : Universidade federal de Pernambuco, 2007.

CZICHOS, Horst. **Tribology: A systems approach to the Science and technology of friction, lubrication and wear.** Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.

DIN 50320: Verschleiß - **Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen**, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth Verlag, Berlin 1979.

FERNANDES, C. M. **Avaliação da eficiência de inibidor de corrosão na presença de inibidores de incrustação e sequestrantes de H<sub>2</sub>S.** Niterói-RJ: Universidade Federal Fluminense (UFF), 2016.

FERNANDES, V. K.; MATERNDAL, C. P. **As formas de corrosão.** Disponível em: <<https://engenheirodemateriais.com.br/2017/04/26/as-formas-de-corrosao/>>. Acesso em: 24 dezr. 2022.

FERRARINI, C. F. **Análise da resistência ao desgaste abrasivo de um revestimento duro obtido pela deposição, por soldagem de uma liga a base de ferro.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1998.

FIGUEIREDO NETO, J. J. **Projeto, fabricação e validação de um abrasômetro roda de borrcha na configuração horizontal e vertical.** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

FRANC, J.-P.; MICHEL, J.-M. **FUNDAMENTALS OF CAVITATION.** First ed.. [s.l: s.n.]. v. vol 1, 2003.

FRAUCHES-SANTOS, C. et al. **The corrosion and the anticorrosion agents.** Revista Virtual de Química, v. 6, n. 2, p. 293–309, 2014.

FREIRE, K. REGINA R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto.** Curitiba-PR: Universidade Federal do Paraná, 2005.

GENTIL, VICENTE. **Corrosão.** 7. ed ed. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e científicos Editora S.A, 2022.

HELLE, A. et al. **Erosive wear of coatings and methods to monitor coating wear-A literature study.** VTT Technical Research center of Finland. Finland, 2004

HUTCHINGS, I.M. **Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials**. Cambridge. British Library Cataloguing in Publication, 1992.

KAJDAS, C.; HARVEY, S. S. K.; WILUSZ, E. **Encyclopedia of tribology**. Elsevier, 1990.

KODAMA, A. L.; HOTSUMI, T. N. **Investigação e Caracterização de Produtos Naturais Como Inibidores de Corrosão Atóxicos Para Aços Carbono em Meio de Ácido Clorídrico**. São Paulo-Sp: Escola Politécnica da Universidade São Paulo, 2011.

LIMA, E. G. A. **AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE INIBIDORA DA CORROSÃO DE AMINAS A PARTIR DO ASPECTO MOLECULAR**. São Carlos - SP: Universidade Federal de São Carlos, 2015.

MAINIER, F. B.; SILVA, R. R. DE C. M. DA. **AS FORMULAÇÕES INIBIDORAS DE CORROSÃO E O MEIO AMBIENTE**. Niterói – RJ, 2004.

MAXI RUBBER. **Especialistas em complementos automotivos**. 2023. Disponível em: <<https://www.maxirubber.com.br/>>

MYRDAL, R. **Corrosion Inhibitors**. COIN Project Report 22. Forskningsveien, 2010.

NACE STANDARD RP-07-75-2005. **Preparation, Instalation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations**, 2005.

NACE STANDARD TM-01-69, 2021. **Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals**, 2021.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1982.

OLIVEIRA, A. R. CORROSÃO E TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE. **E-Tec rede Brasil**, p. 59–100, 2012.

OLIVEIRA, D. **Construção de um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em revestimento duro aplicado por soldagem**. Ilha solteira: Universidade Estadual Paulista, 2015.

PANNONI, F. D. Aços Estruturais. **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM**, 2002.

RIBEIRO, RUBENS. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimento soldados do tipo Fe-C-Cr utilizado na indústria sucroalcooleira**. Ilha Solteira – SP, 2004..

RIBEIRO, A. C. N. et al. Soldagem do Aço Naval AH36 Nacional Produzido Pela TMCP Utilizando os Processos de Arame Tubular na Raiz e Enchimento com Arco Submerso com Um Arame. **68° Congresso anual da abm**, 2013.

RIBEIRO, A. C. N. **Avaliação da soldagem do aço naval AH36 microligado soldado pelo processo de arco submerso com um e dois arames**. São Paulo: Universidade Federal de Campina Grande, jul. 2015.

ROMUALDO, M. V. DOS S. **Estudo de inibidores sintéticos de corrosão para o aço carbono 1020 em meios altamente corrosivos**. Rio de Janeiro-RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

RUCHERT, C. O. F. T. **Materiais para a Indústria Química – Corrosão**. Escola de Engenharia de Lorena, Nova Lorena – SP, 2014.

SANTOS, M. M. DOS. **A aplicação do aço na indústria naval**. Rio de Janeiro: UEZO - Centro Universitário Estadual da Zona-Oeste, 2011.

SHOW, B. K. et al. Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of a microalloyed HSLA steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, n. 6, p. 1595–1604, 15 mar. 2010.

SILVA, F. G. **Resistência ao desgaste por cavitação de diferentes ligas aplicadas pelo processo GMAW com e sem adição de arame frio**. Uberlândia-MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

SILVA, J. F. **Estudo sobre proteção contra corrosão do metal em ambiente salina**. Mossoró: Universidade Federal do Semi-Árido, 2020.

SODERO, M. I. **Formas de corrosão: Corrosão galvânica, em fresta, Corrosão por pites e intergranular**. Vale do Paraíba – SP, 2020.

TOFFOLO, R. V. B. **Estudo comparativo dos aços microligados API-5L-X60 e API-5L-X70, usados para a confecção de tubos, quanto à tenacidade à fratura**. Março—Bela Vista de Minas: Universidade Estadual de Minas Gerais, 2008.

VIDAL, L. A. **Estudo sobre as incrustações inorgânicas nos campos de petróleo**. Niterói - rj: Universidade Federal Fluminense, 23 out. 2015.

WARTHA, E. J. et al. **A maresia no ensino de química**. Erechim – RS, 2007.

**APÊNDICES**

## Apêndice A - Medição das massas das amostras antes e depois do ensaio

3 dias de ensaio			7 dias de ensaio		
<b>Amostra</b>	<b>Antes (g)</b>	<b>Depois (g)</b>	<b>Amostra</b>	<b>Antes (g)</b>	<b>Depois (g)</b>
C_1.1	164,70	153,81	C_1.2	157,41	143,63
C_2.1	141,49	135,22	C_2.2	139,8	131,66
C_3.1	151,23	150,07	C_3.2	142,85	139,30
C_4.1	135,58	135,22	C_4.2	132,57	131,79

Fonte: Dados do autor.