

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA  
FONSECA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**João Vitor Gromik Ribeiro**

**Análise da Corrosão do Aço Inoxidável AISI 317L em Soluções Ácidas sob  
Presença de Inibidor de Corrosão**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RIO DE JANEIRO**

**2025**

**João Vitor Gromik Ribeiro**

**Análise da Corrosão do Aço Inoxidável AISI 317L em Soluções Ácidas sob  
Presença de Inibidor de Corrosão**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica, do DEMEC, do  
Centro Federal de Educação Tecnológica  
Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Nogueira  
Farneze

**RIO DE JANEIRO**

**2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

R484     Ribeiro, João Vitor Gromik  
            Análise da corrosão do aço inoxidável AISI 317L em soluções  
            ácidas sob Presença de Inibidor de Corrosão / João Vitor Gromik  
            Ribeiro. — 2025.  
            56f. : il.(algumas color). ; enc.

            Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
            Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.  
            Bibliografia : f. 65-68  
            Orientador: Humberto Nogueira Farneze

            1. Engenharia mecânica. 2. Aço inoxidável - Corrosão. 3.  
            Inibidores químicos. 4. Software. I. Farneze, Humberto Nogueira.  
            (Orient.). II. Título.

CDD 621

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas podem estar certos de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Humberto Farneze, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Meu sincero agradecimento à minha mãe, Márcia, pelo seu apoio e carinho não só ao longo deste trabalho, mas ao longo de meus 24 anos de vida, sendo um exemplo em todos os quesitos de minha vida. Sua trajetória e caráter são uma grande inspiração para mim.

Agradeço também à minha irmã, Maria Paula, pelo suporte constante e fundamental em todos os projetos de minha vida. À minha namorada, Mariana, pela cumplicidade e inúmeras ajudas prestadas no decorrer deste projeto.

Por fim, deixo meu sincero agradecimento aos amigos que me prestaram apoio durante essa jornada.

A todos, o meu muito obrigado.

## RESUMO

GROMIK, João Vitor. **Análise da Corrosão do Aço Inoxidável AISI 317L em Soluções Ácidas sob Presença de Inibidor de Corrosão**. 2025. 71 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência à corrosão do aço inoxidável AISI 317L quando exposto a soluções de ácido clorídrico (HCl a 5%), simulando condições agressivas, tal como o encontrado no processo de acidificação, que é aplicado na indústria do petróleo. Foram analisadas três amostras do material, submetidas a diferentes concentrações do inibidor orgânico tiouréia ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ ): ausência, 250 mg/L e 500 mg/L. As metodologias empregadas incluíram ensaios eletroquímicos de polarização potenciodinâmica e testes de corrosão por pites, complementados por análises microestruturais via microscopia óptica. Com auxílio do software ImageJ, foi possível quantificar a área afetada por corrosão localizada em cada amostra. Os resultados indicaram que a adição de tiouréia reduziu significativamente a densidade de corrente corrosiva e ampliou o intervalo de passivação, atingindo eficiência máxima de 81,33% na maior concentração testada. Conclui-se que o uso otimizado de inibidores de corrosão é uma estratégia eficaz para prolongar a vida útil de componentes metálicos expostos a ambientes ácidos severos.

**Palavras-chave:** AISI 317L. Ácido clorídrico. Inibidor de corrosão. Tiouréia.

## ABSTRACT

GROMIK, João Vitor. **Análise da Corrosão do Aço Inoxidável AISI 317L em Soluções Ácidas sob Presença de Inibidor de Corrosão**. 2025. 71 pages.

Undergraduate Final Project – Federal Center for Technological Education Celso Suckow da Fonseca – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

This study aimed to evaluate the corrosion resistance of AISI 317L stainless steel when exposed to hydrochloric acid (HCl at 5%), simulating aggressive conditions such as those found in the acidification process used in the petroleum industry. Three samples were analyzed under different concentrations of the organic corrosion inhibitor thiourea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ ): no inhibitor, 250 mg/L, and 500 mg/L. The methodologies included potentiodynamic polarization tests and pitting corrosion experiments, complemented by microstructural analysis using optical microscopy. With the aid of ImageJ software, the pitted area on each sample was quantified. Results showed that the addition of thiourea significantly reduced the corrosion current density and increased the passivation range, achieving a maximum inhibition efficiency of 81.33% at the highest concentration tested. It is concluded that the optimized use of corrosion inhibitors is an effective strategy to extend the service life of metallic components exposed to severe acidic environments.

**Keywords:** AISI 317L. Hydrochloric acid. Corrosion inhibitors. Thiourea.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1 - Composição típica dos principais aços inoxidáveis austeníticos. ....                                                             | 10 |
| Figura 2-1 - Regiões empobrecidas em cromo .....                                                                                              | 14 |
| Figura 2-2 - Formas de Corrosão. ....                                                                                                         | 17 |
| Figura 2-3 - Mecanismos de corrosão eletroquímica. ....                                                                                       | 18 |
| Figura 2-4 - Camada passiva do aço inoxidável.....                                                                                            | 19 |
| Figura 2-5 - Velocidade de corrosão em aço inoxidável.....                                                                                    | 20 |
| Figura 2-6 - Curva de polarização mostrando várias zonas de eventos de corrosão, incluindo passividade. ....                                  | 21 |
| Figura 2-7 - Corrosão por pite em superfície do aço inoxidável austenítico em solução ácida fosfórica poluída com 2% (em massa) de HF .....   | 22 |
| Figura 2-8 - Representação do processo autocatalítico na corrosão por pites.....                                                              | 23 |
| Figura 2-9 - Influência de alguns elementos da liga sobre a resistência à corrosão por pites.....                                             | 24 |
| Figura 2-10 - Temperatura crítica de corrosão versus teor de molibdênio para aços inoxidáveis austeníticos testados em 10% <b>FeCl3</b> ..... | 25 |
| Figura 2-11 - Corrosão dos aços inoxidáveis nos meios ácidos redutores.....                                                                   | 26 |
| Figura 2-12 - Processo de acidificação de poço onshore de petróleo.....                                                                       | 27 |
| Figura 2-13 - Estimulação ácida de uma rocha reservatório. ....                                                                               | 28 |
| Figura 2-14 - Aplicação de inibidores de corrosão. ....                                                                                       | 30 |
| Figura 2-15 - Diagrama de polarização: ação de inibidor (I) anódico (II) catódico. ....                                                       | 31 |
| Figura 2-16 - Estrutura molecular da tiouréia. ....                                                                                           | 32 |
| Figura 2-17 - Curvas de polarização do aço carbono em HCl 10% (em massa) com adições de tiouréia e cloro.....                                 | 33 |
| Figura 2-18 - Curvas de polarização do aço carbono em HCl 10% (em massa) com adições de tiouréia e cloro.....                                 | 34 |
| Figura 2-19 - Ação do agente divergente sobre a área tratada do reservatório. ....                                                            | 35 |
| Figura 2-20 - Técnicas de Estimulação. ....                                                                                                   | 36 |
| Figura 2-21 - Alteração de fluxo gerada pelo fraturamento. ....                                                                               | 37 |
| Figura 2-22 - Ensaio eletroquímico (polarização).....                                                                                         | 38 |
| Figura 2-23 - Inclinação das retas de Tafel. ....                                                                                             | 39 |
| Figura 2-24 - Curva da análise de corrosão por pites. ....                                                                                    | 41 |
| Figura 3-1 - Imagem obtida por MEV da microestrutura do aço AISI 317L. ....                                                                   | 43 |
| Figura 3-2 - Exemplo de Rabo de Andorinha. ....                                                                                               | 44 |
| Figura 3-3 - Amostras Embutidas.....                                                                                                          | 45 |
| Figura 3-4 - Indicação de amostras e camada de esmalte.....                                                                                   | 45 |
| Figura 3-5 - Componentes da célula eletrolítica. ....                                                                                         | 47 |
| Figura 3-6 – Software e potenciostato usados para captura de dados. ....                                                                      | 47 |
| Figura 3-7 - Eletrodo de calomelano utilizado. ....                                                                                           | 48 |
| Figura 3-8 - Microscópio óptico Olympus modelo BX60M.....                                                                                     | 51 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3-9 - (a) Imagem obtida por MO e (b) Imagem binária para contagem de pixels através do software Image J. .... | 51 |
| Figura 4-1 - Curva TAFEL, amostra sem inibidor. ....                                                                 | 54 |
| Figura 4-2 - Curva TAFEL, amostra 250mg/L de inibidor. ....                                                          | 54 |
| Figura 4-3 - Curva TAFEL, amostra 500mg/L de inibidor. ....                                                          | 55 |
| Figura 4-4 - Gráfico comparativo da Densidade de corrente X Concentração de Tiouréia. ....                           | 57 |
| Figura 4-5 - Gráfico comparativo da Resistência à Polarização X Concentração de Tiouréia. ....                       | 57 |
| Figura 4-6 - Curva de corrosão por pites, sem inibidor.....                                                          | 59 |
| Figura 4-7 - Curva de corrosão por pites, 250mg/L.....                                                               | 59 |
| Figura 4-8 - Curva de corrosão por pites, 500mg/L.....                                                               | 60 |
| Figura 4-9 - Gráfico comparativo do Intervalo de Passivação X Concentração de Tiouréia. ....                         | 61 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2-1 – Detalhamento de PREN por aço. ....                                  | 15 |
| Tabela 2-3 - Tabela comparativa de permeabilidade efetiva de reservatórios. .... | 36 |
| Tabela 2-4 - Classificação da taxa de corrosão em milímetros por ano. ....       | 40 |
| Tabela 3-1 - Composição química do metal base (% em peso). ....                  | 42 |
| Tabela 3-2 - Identificação das Amostras. ....                                    | 46 |
| Tabela 3-3 - Relação de áreas no ensaio de polarização. ....                     | 49 |
| Tabela 3-4 - Área de exposição no ensaio potenciodinâmico cíclico. ....          | 50 |
| Tabela 4-1 - Peso Equivalente Material Base ....                                 | 53 |
| Tabela 4-2 - Variáveis obtidas a partir das curvas de polarização. ....          | 55 |
| Tabela 4-3 - Eficiência do Inibidor de Corrosão. ....                            | 58 |
| Tabela 4-4 - Intervalo de Passivação de cada amostra.....                        | 60 |
| Tabela 4-5 - Área percentual de pite por cada foto de amostra. ....              | 61 |
| Tabela 4-6 - Área média de pite por amostra. ....                                | 62 |

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

- AISI – American Iron and Steel Institute
- L – Low Carbon
- CFC – Estrutura Cúbica de Face Centrada
- $\Sigma$  - Fase sigma
- $\chi$  - Fase chi
- $M_{23}C_6$  – Carboneto de Cromo
- PREN – Pitting Resistance Equivalent Number
- Å – Constante de Ångström, equivalente a 0,1 nanômetros
- mD – Milidarcy (medida de permeabilidade)
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- OCP – Potencial de Circuito Aberto

## SUMÁRIO

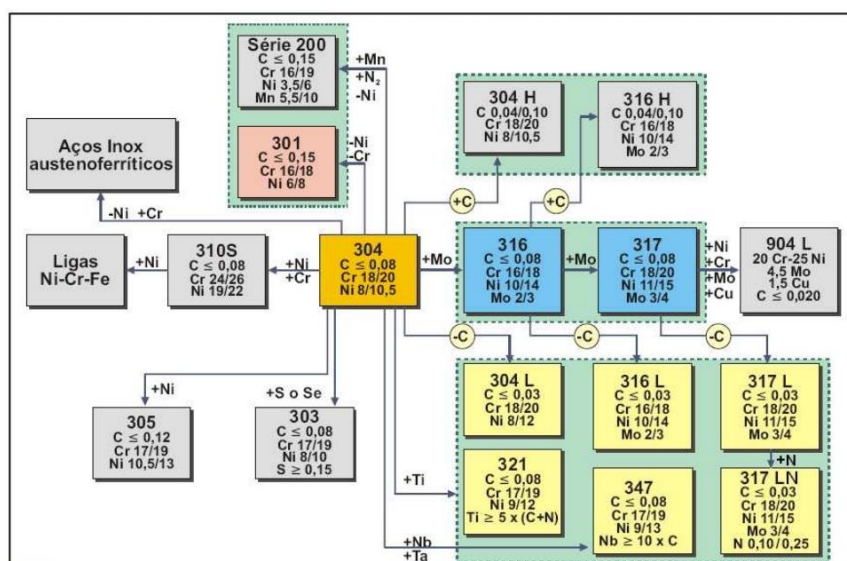
|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                                    | <b>10</b> |
| 1.1 MOTIVAÇÃO .....                                                         | 10        |
| 1.2 JUSTIFICATIVA.....                                                      | 10        |
| 1.3 OBJETIVO .....                                                          | 11        |
| 1.4 METODOLOGIA E TRABALHO REALIZADO .....                                  | 11        |
| 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....                                            | 12        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                        | <b>13</b> |
| 2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.....                                      | 13        |
| 2.1.1 Aspectos Gerais.....                                                  | 13        |
| 2.1.2 O Aço Inoxidável Austenítico AISI 317L .....                          | 14        |
| 2.2 CORROSÃO .....                                                          | 16        |
| 2.2.1 A Passividade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos .....                 | 18        |
| 2.2.2 Corrosão por Pites .....                                              | 21        |
| 2.2.3 Comportamento dos Aços Inoxidáveis Austeníticos em Meios Ácidos ..... | 25        |
| 2.3 INIBIDORES DE CORROSÃO .....                                            | 28        |
| 2.3.1 Aplicação e Classificação dos Inibidores de Corrosão .....            | 29        |
| 2.3.2 Tiouréia e Derivados .....                                            | 31        |
| 2.4 ESTIMULAÇÃO ÁCIDA DE POÇOS DE PETRÓLEO .....                            | 34        |
| 2.5 ENSAIO DE POLARIZAÇÃO .....                                             | 37        |
| 2.6 ENSAIO POTENCIODINÂMICO CÍCLICO .....                                   | 40        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                           | <b>42</b> |
| 3.1 MATERIAL .....                                                          | 42        |
| 3.2 ENSAIOS DE CORROSÃO .....                                               | 43        |
| 3.2.1 Preparação dos Eletrodos de Trabalho (ET).....                        | 43        |
| 3.2.2 Soluções Eletrolíticas Utilizadas nos Ensaios.....                    | 46        |
| 3.2.3 Ensaio de Polarização .....                                           | 46        |
| 3.2.4 Ensaio Potenciodinâmico Cíclico .....                                 | 49        |
| 3.3 MICROSCOPIA ÓTICA (MO) .....                                            | 50        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                        | <b>52</b> |
| 4.1 ENSAIO DE POLARIZAÇÃO .....                                             | 52        |
| 4.2 ENSAIO POTENCIODINÂMICO CÍCLICO .....                                   | 58        |
| <b>5 CONCLUSÕES.....</b>                                                    | <b>63</b> |

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| <b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b> | <b>64</b> |
| <b>7 REFERÊNCIAS .....</b>                     | <b>65</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentados na Figura 1-1, em especial o AISI 317L, representam materiais fundamentais para aplicações industriais que demandam resistência à corrosão aliada a boas propriedades mecânicas em condições extremas. A composição química do 317L, que inclui teores controlados de carbono e adições estratégicas de molibdênio (Mo), confere a este material características superiores em ambientes agressivos, como os encontrados na indústria de petróleo e gás. No entanto, mesmo materiais com tal desempenho enfrentam desafios significativos quando expostos a meios ácidos concentrados, situação comum em operações de estimulação ácida de poços de petróleo. A corrosão nesses meios constitui um problema complexo e multifatorial, com impactos econômicos e operacionais relevantes. (BARBOSA, 2023)



**Figura 1-1 - Composição típica dos principais aços inoxidáveis austeníticos.**  
Fonte: (CARBÔ, 2011)

### 1.2 JUSTIFICATIVA

Embora a resistência à corrosão do AISI 317L seja elevada, a exposição prolongada a soluções de ácido clorídrico (HCl) em condições operacionais típicas

pode levar a processos de degradação acelerada. Essa vulnerabilidade é crítica em aplicações onde o material está sujeito a fatores como temperatura elevada e tensões mecânicas. O estudo do comportamento deste aço reveste-se de importância considerando seu amplo uso em equipamentos críticos como tubulações e bombas, onde falhas podem ter consequências graves de segurança e custos operacionais. A compreensão detalhada dos mecanismos de degradação e a avaliação de estratégias de proteção, como o uso de inibidores de corrosão, são essenciais para garantir a confiabilidade desses sistemas e a otimização da vida útil de componentes industriais.

### 1.3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho e a resistência à corrosão do aço inoxidável AISI 317L em condições simuladas de operação industrial. Especificamente, busca-se investigar o comportamento do material em solução de HCl a 5%, analisando a eficácia da tiouréia ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ ) como inibidor de corrosão em diferentes concentrações (250 mg/L e 500 mg/L), comparando-as à condição sem inibidor para determinar o potencial de mitigação de danos em aplicações industriais. (BRAGA, 2015)

### 1.4 METODOLOGIA E TRABALHO REALIZADO

Este estudo segue uma abordagem experimental e quantitativa para a análise de fenômenos corrosivos. O trabalho consistiu na submissão de amostras de aço AISI 317L a ensaios eletroquímicos de polarização potenciodinâmica (extrapolação de Tafel) e ensaios potenciodinâmicos cíclicos, visando determinar a taxa de corrosão e a susceptibilidade à corrosão por pites. Os ensaios foram realizados em meio ácido (HCl 5%) com e sem a presença do inibidor tiouréia. Complementarmente, realizou-se a análise microestrutural via microscopia ótica (MO). Os dados foram tratados quantitativamente através de cálculos de eficiência de inibição e do uso do software ImageJ para a binarização de imagens, permitindo a quantificação da área de pites e a correlação entre os resultados eletroquímicos e morfológicos.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em sete capítulos, conforme descrito abaixo:

1. O primeiro capítulo refere-se às motivações, justificativas e aos objetivos que fundamentaram a escolha do tema.
2. Realizou-se, no segundo capítulo, uma minuciosa revisão bibliográfica para o embasamento teórico e conceitual sobre aços inoxidáveis austeníticos, fenômenos de corrosão, inibidores e estimulação ácida.
3. No que concerne ao terceiro capítulo, composto pelos materiais e métodos utilizados, este consistiu no detalhamento da preparação das amostras, configuração da célula eletrolítica e descrição dos ensaios de polarização e microscopia ótica.
4. O quarto capítulo é dedicado à apresentação e discussão dos resultados obtidos nos ensaios de polarização e análise de pites.
5. O quinto capítulo sintetiza as principais conclusões extraídas da pesquisa.
6. O sexto capítulo apresenta sugestões para a continuidade do estudo em trabalhos futuros.
7. Por fim, o sétimo capítulo lista as referências bibliográficas consultadas durante a elaboração deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem por objetivo abordar os diferentes assuntos existentes no trabalho, assim como explicar sucintamente cada um deles, de forma a permitir a compreensão dos conceitos e aspectos que envolvem este estudo.

### 2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

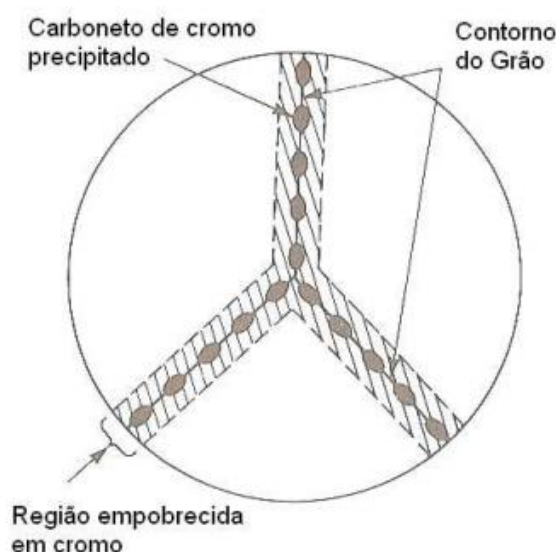
#### 2.1.1 Aspectos Gerais

Os aços inoxidáveis austeníticos representam uma das classes mais versáteis e amplamente utilizadas de materiais metálicos na indústria moderna. Esses materiais têm apresentado avanços significativos nas últimas décadas, particularmente no que diz respeito ao aprimoramento de suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Essa evolução tem permitido sua aplicação em condições cada vez mais extremas, desde ambientes altamente corrosivos até situações que combinam solicitações mecânicas e térmicas complexas. (LO; SHEK; LAI, 2009)

A excelente combinação de propriedades desses aços decorre de sua estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), característica da austenita, que lhes confere notável ductilidade e tenacidade mesmo em baixas temperaturas. Além disso, sua composição química balanceada, tipicamente contendo cromo (Cr), níquel (Ni) e, em muitos casos, molibdênio (Mo), proporciona uma resistência à corrosão superior em comparação com outras classes de aços inoxidáveis. Essa combinação única de características os torna particularmente adequados para aplicações críticas em setores como químico, petroquímico, alimentício, farmacêutico e nuclear.

Dentre os aspectos fundamentais que caracterizam os aços inoxidáveis austeníticos, destaca-se o comportamento das fases precipitadas durante processos térmicos ou exposição prolongada a temperaturas elevadas. Conforme demonstrado por Lo, Shek e Lai (2009), a formação de certas fases intermetálicas, como a fase sigma ( $\sigma$ ) e a fase chi ( $\chi$ ), além de carbeto como  $M_{23}C_6$ , exerce influência determinante no desempenho desses materiais. Esses fenômenos de precipitação

ocorrem preferencialmente nas regiões de contorno de grão, podendo levar ao processo conhecido como sensitização, exemplificado pela Figura 2-1.



**Figura 2-1 - Regiões empobrecidas em cromo**  
**Fonte: (SEDRIKS, 1996)**

A sensitização, conforme descrito pelos autores mencionados, caracteriza-se pela depleção localizada de cromo ao redor dos carbeto formados, o que compromete significativamente a capacidade de formação do filme passivo protetor. Esse fenômeno é particularmente relevante em aços contendo molibdênio em sua composição, onde a precipitação de fases ricas nesse elemento pode afetar substancialmente a homogeneidade química do material. Tais características microestruturais influenciam diretamente o comportamento do material em meios agressivos, sendo, portanto, aspectos críticos para a seleção e aplicação desses aços em condições operacionais desafiadoras.

### 2.1.2 O Aço Inoxidável Austenítico AISI 317L

O aço inoxidável austenítico AISI 317L se destaca como um material de elevada resistência à corrosão, especialmente em ambientes agressivos, graças ao seu significativo teor de molibdênio (Mo), que atinge aproximadamente 3,0% em peso. Essa composição química aprimorada o torna superior ao AISI 316L em aplicações críticas, como em indústrias químicas, petroquímicas e de refino de petróleo, onde a

exposição a ácidos orgânicos fortes, incluindo os ácidos naftênicos, é frequente. (FARRAR, 2004; SILVA, 2015).

Além do molibdênio, o AISI 317L apresenta teores mais elevados de cromo (Cr) e níquel (Ni) em comparação ao AISI 316L, garantindo uma estrutura austenítica estável mesmo em condições extremas. A versão "L" (low carbon), com teor de carbono inferior a 0,03%, é fundamental para evitar a sensitização durante processos de soldagem ou tratamentos térmicos, preservando assim suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão em juntas soldadas.

Em termos de desempenho, o AISI 317L supera o AISI 316L não apenas na resistência à corrosão localizada, como pites e frestas, mas também em propriedades mecânicas e resistência à fluência em altas temperaturas. O PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) do AISI 317L é superior ao do AISI 316L, um reflexo direto da maior concentração de molibdênio em sua composição, como evidencia a Tabela 2-1, mostrada abaixo. (FARRAR, 2004).

**Tabela 2-1 – Detalhamento de PREN por aço.**

| Elemento (%) | C    | Cr | Ni   | Mo  | N (ppm) | PREN |
|--------------|------|----|------|-----|---------|------|
| AISI 316L    | 0,03 | 17 | 10   | 2,0 | 300     | 25   |
| AISI 317L    | 0,03 | 18 | 11,5 | 3,0 | 600     | 30   |

**Fonte: Adaptação do autor (Brasil Aperam, 2023)**

Sua aplicação é amplamente difundida em setores que exigem durabilidade e resistência a meios altamente corrosivos. Na indústria química e petroquímica, é utilizado em equipamentos expostos a ácidos orgânicos e soluções agressivas. Na indústria de papel e celulose, destaca-se pela resistência a meios químicos utilizados no processamento. Além disso, é empregado em juntas de expansão e condensadores de geradores de energia, tanto em usinas termelétricas a combustível fóssil quanto em usinas nucleares. Um caso emblemático de sua aplicação é a substituição do aço 5Cr-½Mo em fornos de destilação, onde a presença de ácidos naftênicos e H<sub>2</sub>S exige materiais com maior resistência à corrosão, especialmente em condições de vaporização da carga, que aceleram os processos corrosivos (SILVA, 2015; MEGALIGAS, 2017).

Em síntese, o AISI 317L ocupa uma posição estratégica entre os aços inoxidáveis convencionais e os superausteníticos de alto custo. Sua combinação de resistência à corrosão, desempenho mecânico e versatilidade em aplicações críticas o torna uma escolha preferencial em ambientes onde a durabilidade e a confiabilidade são requisitos essenciais. Sua composição balanceada e propriedades otimizadas garantem um desempenho superior em comparação ao AISI 316L, consolidando seu papel como material de excelência em condições operacionais severas. (FARRAR *apud* FARNEZE, 2016).

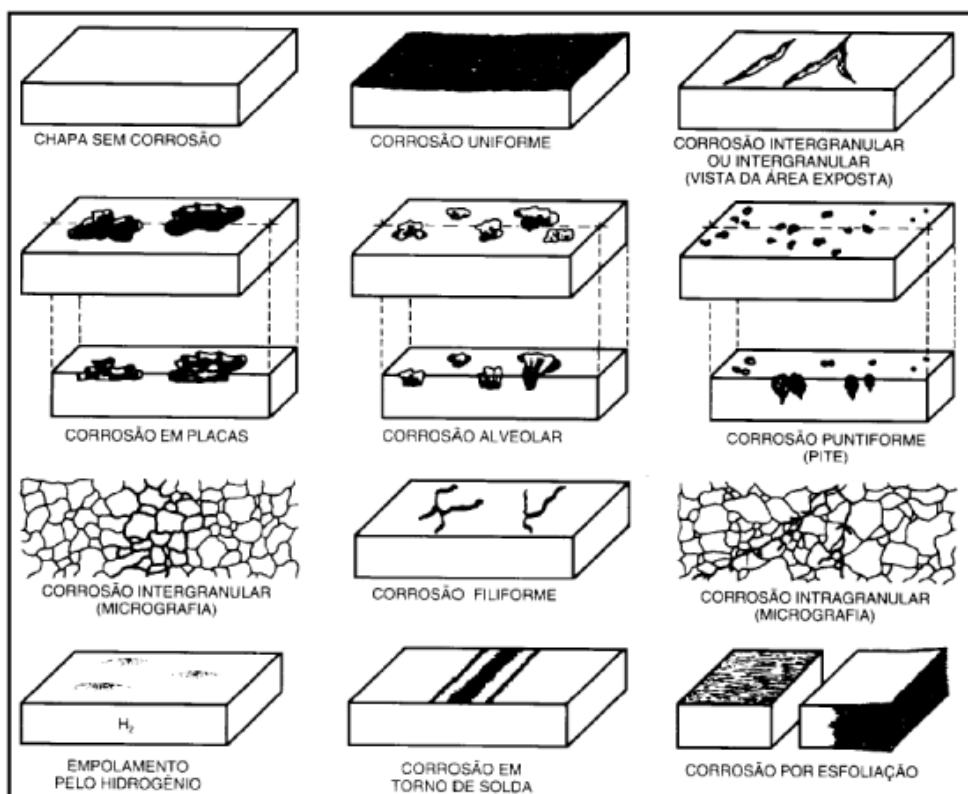
## 2.2 CORROSÃO

A corrosão é um fenômeno de degradação de materiais metálicos resultante de reações químicas, eletroquímicas ou eletrolíticas com o meio ambiente, levando a alterações estruturais e funcionais que comprometem sua performance. Segundo Gentil (2011), esse processo é essencialmente uma reação de oxirredução, na qual o metal atua como redutor, cedendo elétrons a agentes oxidantes presentes no meio, como umidade, substâncias ácidas ou sais. A corrosão é um fenômeno espontâneo e ubíquo, afetando setores críticos como indústrias petroquímicas, transporte marítimo, construção civil e sistemas de energia, sendo responsável por cerca de 29% das falhas em plantas industriais.

Os mecanismos de corrosão podem ser classificados em três categorias principais: química, eletroquímica e eletrolítica. A corrosão química ocorre em altas temperaturas, como em fornos e caldeiras, onde agentes agressivos atacam diretamente a superfície metálica sem transferência de elétrons, formando produtos de corrosão como óxidos ou sulfetos (GENTIL, 2011). Já a corrosão eletroquímica, mais comum em ambientes úmidos ou em contato com eletrólitos (como água do mar ou solo), envolve a formação de células galvânicas, com regiões anódicas (onde o metal é oxidado) e catódicas (onde ocorre a redução de espécies como  $O_2$  ou  $H^+$ ). Esse processo é dividido em três etapas: dissolução do metal no ânodo, transferência de elétrons pelo metal e de íons pelo eletrólito, e reações de redução no cátodo (GENTIL, 2011; MAINIER, 2018). A corrosão eletrolítica, por sua vez, é induzida por correntes parasitas externas, típica em tubulações enterradas ou submersas, como

oleodutos e gasodutos, onde falhas de isolamento geram pontos localizados de ataque (MAINIER, 2018).

Dentre as formas de corrosão, destacam-se a corrosão por pite, comum em oleodutos e estruturas expostas a cloretos, que se inicia em falhas na camada passiva e evolui para cavidades profundas (RENNER, 2021); a corrosão sob tensão (CST), que combina esforços mecânicos e meio corrosivo, típica em juntas soldadas; e a corrosão intergranular, onde a precipitação de carbeto em contornos de grão em aços inoxidáveis sensibilizados cria caminhos preferenciais para o ataque (HO, 2018). Outros tipos incluem a corrosão uniforme, filiforme, por fresta e microbiológica, cada uma com mecanismos e morfologias distintas, como ilustrado na Figura 2-2 abaixo com diferentes micrografias.



**Figura 2-2 - Formas de Corrosão.**  
**Fonte: Gentil, 2011**

A compreensão desses mecanismos é vital para a seleção de materiais e técnicas de proteção, como inibidores de corrosão, revestimentos ou projetos que minimizem tensões residuais. O estudo da corrosão não apenas reduz perdas econômicas, mas também mitiga riscos ambientais e de segurança, especialmente em setores como o petrolífero, onde a corrosão por ácidos naftênicos e  $H_2S$ ,

detalhados abaixo pela Figura 2-3, exige soluções especializadas (SILVA, 2015; MEGALIGAS, 2017).

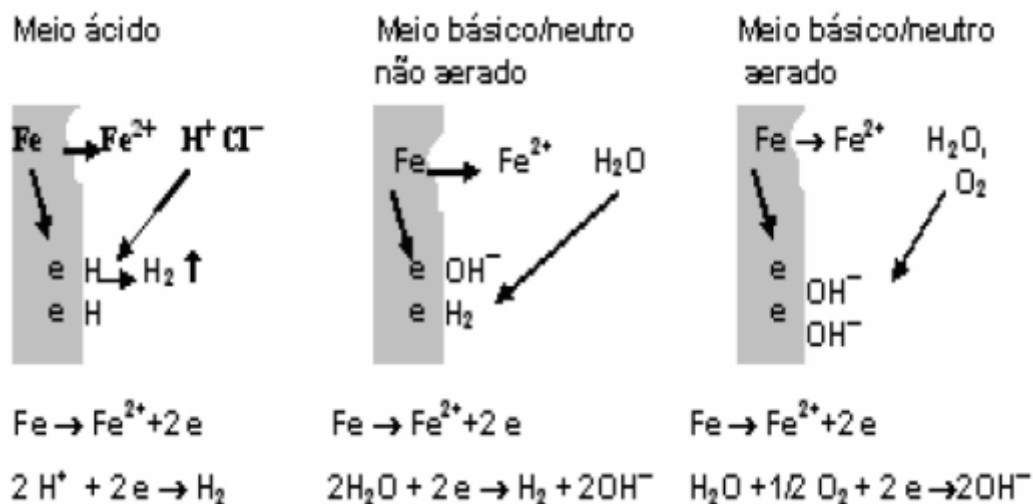
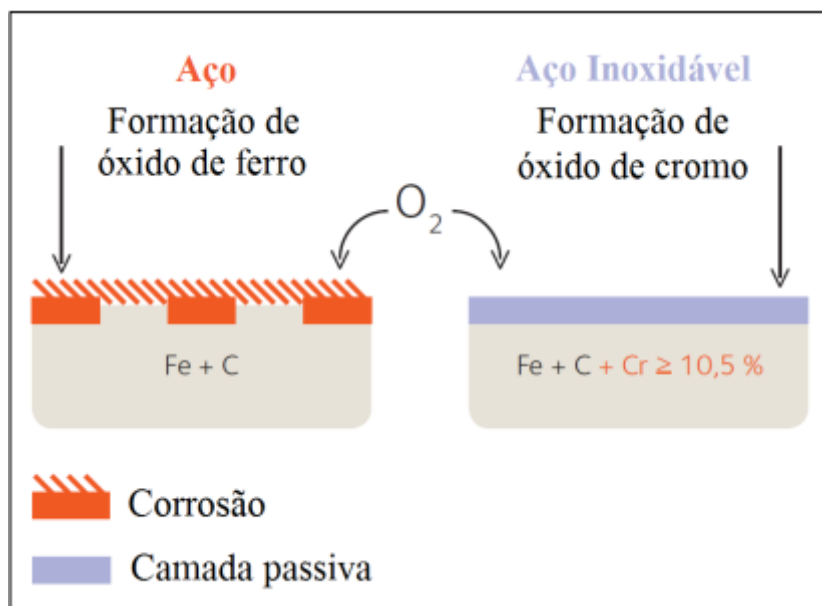


Figura 2-3 - Mecanismos de corrosão eletroquímica.  
Fonte: (MAINIER, 2018).

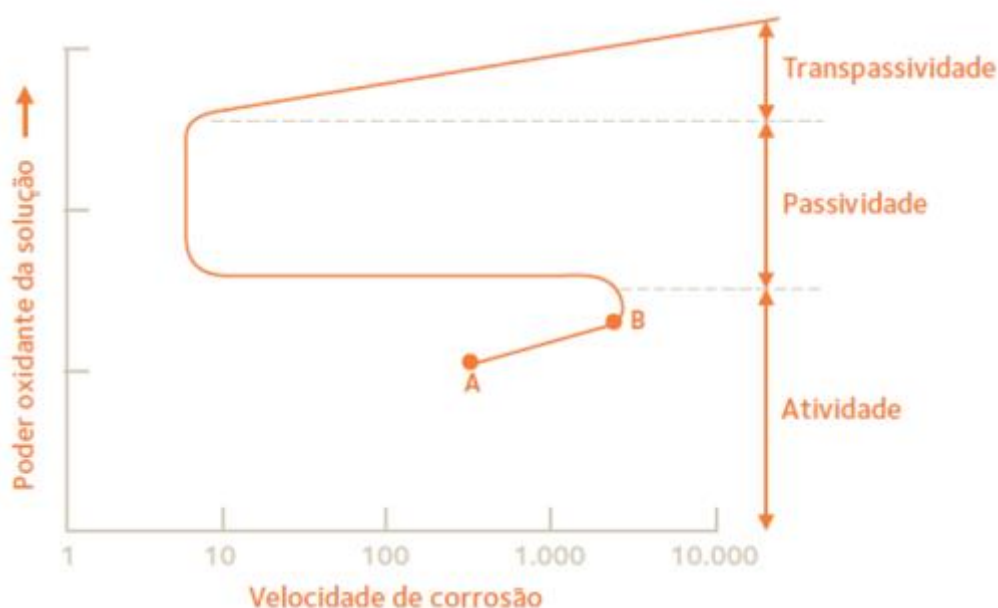
### 2.2.1 A Passividade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

A passividade dos aços inoxidáveis austeníticos é um fenômeno fundamental que confere a esses materiais sua excepcional resistência à corrosão. Essa propriedade surge da formação espontânea de uma camada ultrafina (20-100 Å) de óxidos e hidróxidos na superfície do metal, predominantemente composta por  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (óxido de cromo), quando exposta a ambientes oxidantes (ASTM A380-06, 2006). A Figura 2-4 ilustra essa camada passiva duplex, onde a região interna consiste em óxidos metálicos e a externa em hidróxidos, garantindo proteção contra agentes agressivos. Elementos como níquel (Ni), molibdênio (Mo) e nitrogênio (N) atuam como estabilizadores da austenita e reforçam a estabilidade do filme, especialmente em presença de cloretos (MUDALI e PUJAR, 2002).



**Figura 2-4 - Camada passiva do aço inoxidável.**  
**Fonte: Adaptado de ArcelorMittal - Stainless Europe (2010).**

O comportamento passivo é caracterizado por três regiões distintas na curva de polarização anódica: atividade, passividade e transpassividade. A Figura 2-5 mostra como, após um aumento inicial na velocidade de corrosão (ponto A), a formação do filme passivo (ponto B) reduz drasticamente a taxa de degradação, mantendo-se estável até que potenciais muito elevados levem à transpassividade (CARBÓ, 2008). Esse equilíbrio é mantido pela capacidade de autorreparação da camada, onde danos localizados são rapidamente repassivados, desde que o meio contenha oxidantes suficientes.

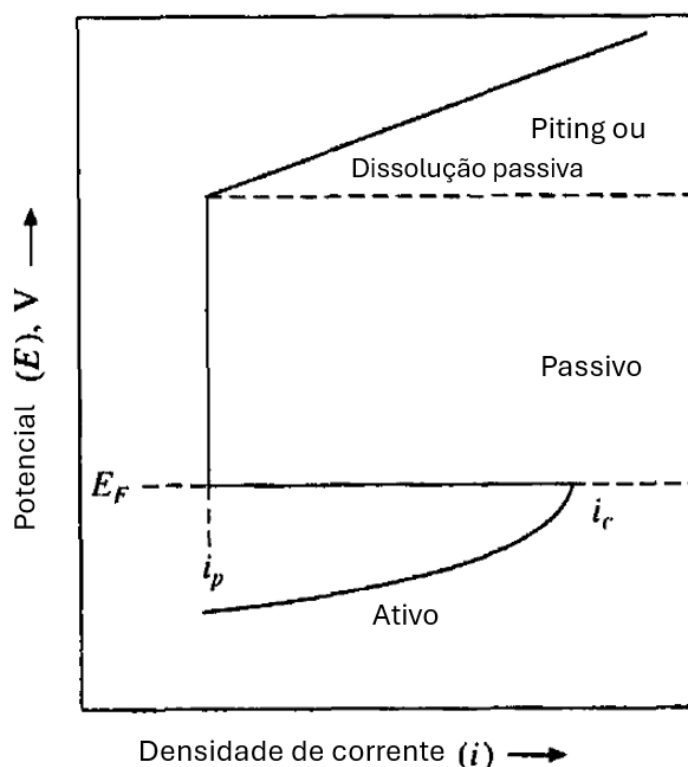


**Figura 2-5 - Velocidade de corrosão em aço inoxidável.**  
**Fonte: Carbó, 2008**

A ruptura da passividade, no entanto, ocorre em condições específicas, como na presença de íons haletos ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ) ou em regiões microestruturalmente heterogêneas (inclusões, contornos de grão). Alguns mecanismos de Ruptura são: (1) adsorção competitiva de haletos, que deslocam o oxigênio da camada passiva; (2) penetração de íons agressivos através de defeitos no filme; e (3) ruptura mecânica devido a tensões internas (MUDALI e PUJAR, 2002). Esses processos são particularmente críticos em soldas, onde a precipitação de carbeto e fases intermetálicas cria zonas empobrecidas em cromo, facilitando a nucleação de pites.

A compreensão da passividade é essencial para aplicações em ambientes agressivos, como indústrias químicas e marinhas. O controle da composição da liga (alto teor de Cr e Mo) e de parâmetros operacionais (potencial, pH) permite otimizar a formação e manutenção do filme passivo. Observa-se na Figura 2-6 a relação entre potencial aplicado ( $E$ ), e os regimes de corrosão, reforçando a importância de operar na região passiva para garantir a durabilidade desses materiais. (ASTM A380-06, 2006). Onde:

- $E_F$  - Potencial de Flade
- $i_p$  – Corrente de Passivação
- $i_r$  – Corrente de Repassivação

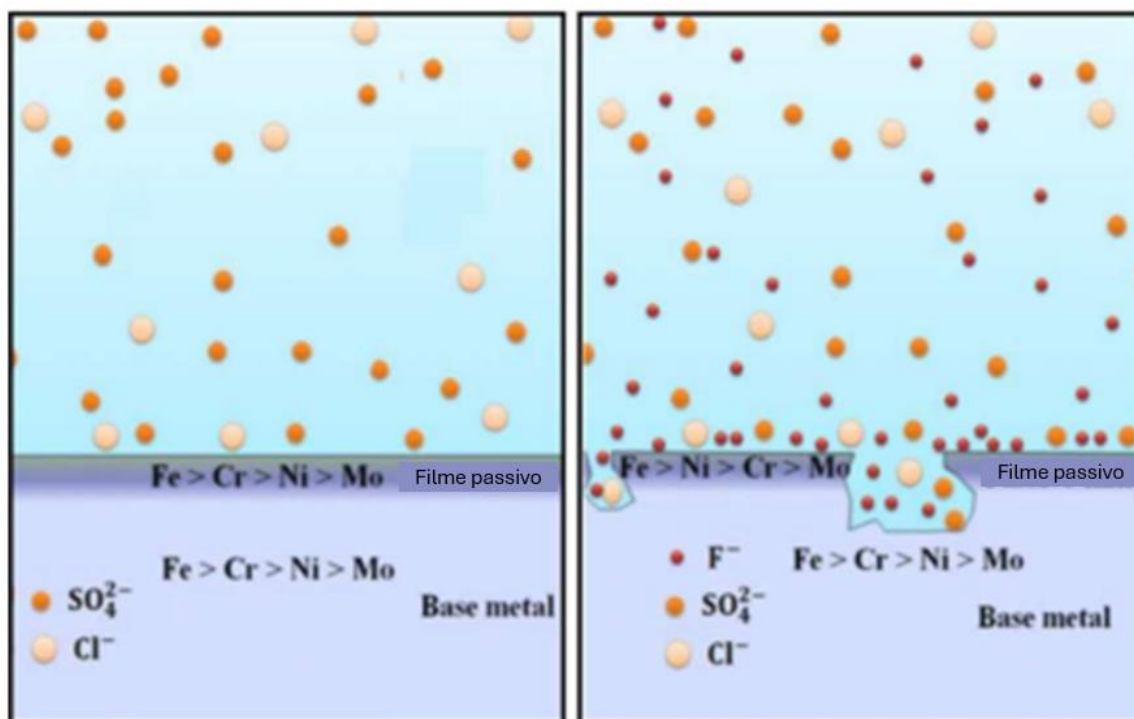


**Figura 2-6 - Curva de polarização mostrando várias zonas de eventos de corrosão, incluindo passividade.**

**Fonte: H. S. Khatak & Baldev Raj; 2006**

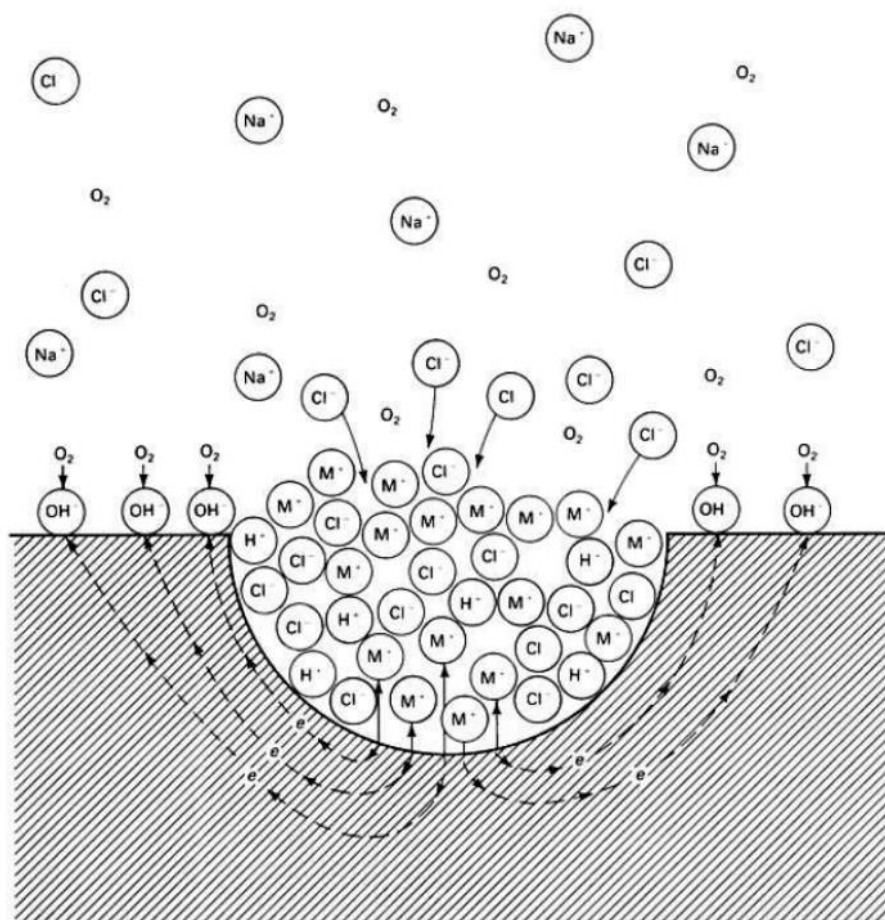
### 2.2.2 Corrosão por Pites

A corrosão por pites é um fenômeno eletroquímico complexo que afeta principalmente metais passiváveis, como os aços inoxidáveis austeníticos. O processo inicia-se com a ruptura localizada da camada passiva de óxido de cromo, geralmente em locais de heterogeneidade microestrutural. A Figura 2-7 mostra a competição entre o filme passivo e os íons agressivos ilustrando claramente este delicado equilíbrio que, quando rompido, dá início ao processo corrosivo. (Gentil, 2011).



**Figura 2-7 - Corrosão por pite em superfície do aço inoxidável austenítico em solução ácida fosfórica poluída com 2% (em massa) de HF**  
**Fonte: Adaptação do autor (KERROUM, 2019)**

O ambiente autocatalítico formado no interior dos pites é um dos aspectos mais críticos deste fenômeno. À medida que a corrosão progride, a hidrólise dos íons metálicos leva à acidificação local ( $\text{pH} \approx 1,0-1,5$ ), criando condições extremamente agressivas (ASM INTERNATIONAL, 1987). A Figura 2-8 representa o processo autocatalítico em solução aquosa aerada contendo NaCl demonstrando como este mecanismo se autoalimenta, acelerando a degradação do material.



**Figura 2-8 - Representação do processo autocatalítico na corrosão por pites.**  
**Fonte: (ASM INTERNATIONAL, 1987).**

A resistência à corrosão por pites pode ser avaliada através do PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*), que incorpora os efeitos dos principais elementos de liga. A tabela periódica adaptada (Figura 2-9) mostra a influência dos diferentes elementos na resistência à corrosão por pites oferece uma visão abrangente de como a composição química afeta o desempenho do material. (MUDALI, 2002).

|     |    |     |       |      |    |    |    |     |      |     |    |
|-----|----|-----|-------|------|----|----|----|-----|------|-----|----|
|     |    |     |       |      |    |    |    |     | IIIA | IVA | VA |
|     |    |     |       |      |    |    |    |     | B    | C   | N  |
|     |    |     |       |      |    |    |    |     | ▽    | ▽   | ■  |
|     |    |     |       |      |    |    |    |     | Al   | Si  | P  |
|     |    |     |       |      |    |    |    |     | —    | ■   | □  |
| IVB | VB | VIB | VIIIB | VII  |    |    | IB | IIB |      |     |    |
| Ti  | V  | Cr  | Mn    | Fe   | Co | Ni | Cu | Zn  | Go   | Ge  | As |
| ×   | ■  | ■   | ×     | Base | □  | ■  | ▽  | —   | —    | —   | —  |
| Zr  | Cb | Mo  | Tc    | Ru   | Rh | Pd | Ag | Cd  | In   | Sn  | Sb |
| □   | ×  | ■   | —     | —    | —  | —  | ■  | —   | —    | □   | —  |
| Hf  | Ta | W   | Re    | Os   | Ir | Pt | Au | Hg  | Tl   | Pb  | Bi |
| —   | □  | ■   | ■     | —    | —  | —  | —  | —   | —    | □   | —  |

\* Segmentos de elementos da tabela periódica

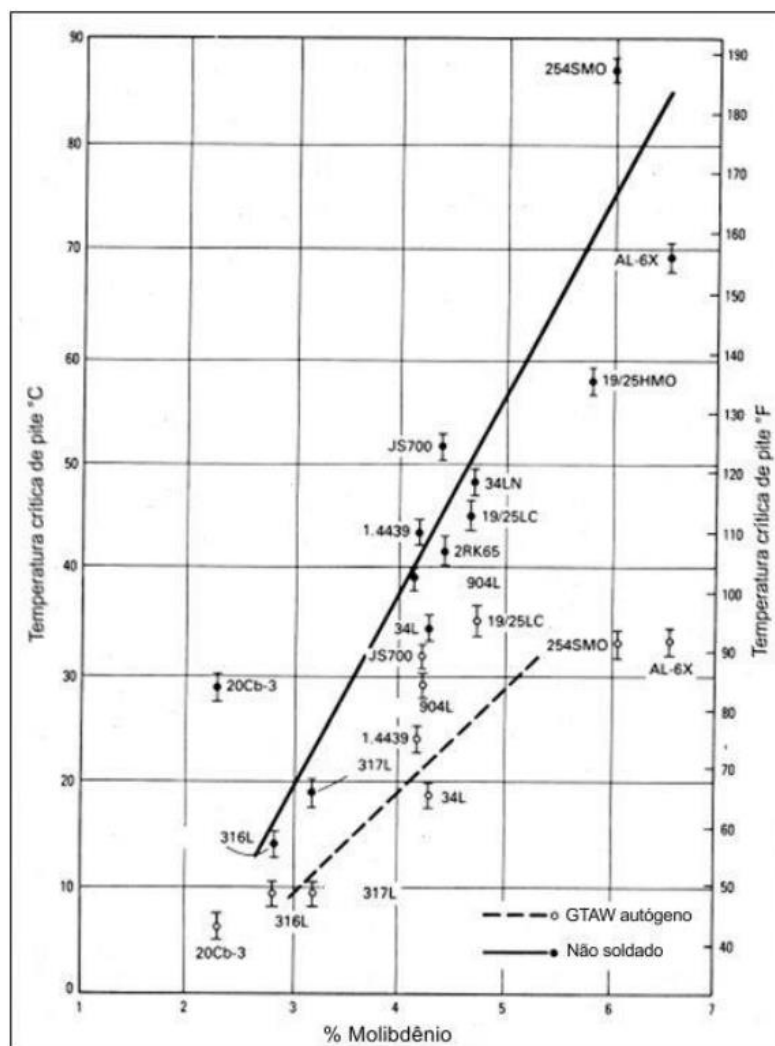
|                   |               |
|-------------------|---------------|
| ■ Benéfico        | ▽ Variável    |
| □ Sem efeito      | × Prejudicial |
| — Não investigado |               |

|    |    |
|----|----|
| Gd | Ce |
| ×  | ×  |

Figura 2-9 - Influência de alguns elementos da liga sobre a resistência à corrosão por pites.  
Fonte: Adaptado de Mudali e Pujar (2002).

As técnicas de avaliação da resistência à corrosão por pites incluem métodos eletroquímicos sofisticados. A curva de polarização potenciodinâmica cíclica, que mostra os pontos de potencial de pite e repassivação, é particularmente útil para determinar a susceptibilidade dos materiais a este tipo de corrosão.

Em aplicações industriais, a corrosão por pites representa desafios específicos em juntas soldadas. A microestrutura resultante do processo de soldagem, com suas heterogeneidades e fases secundárias, cria áreas preferenciais para o início da corrosão. O gráfico, apresentado na Figura 2-10, mostra a variação da temperatura crítica de pites em função do teor de molibdênio em aços inoxidáveis austeníticos fornece dados valiosos para a seleção de materiais em ambientes agressivos.

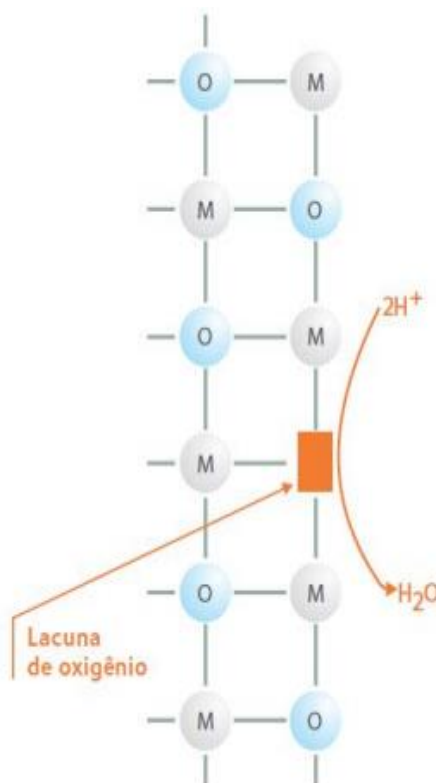


**Figura 2-10 - Temperatura crítica de corrosão versus teor de molibdênio para aços inoxidáveis austeníticos testados em 10%  $FeCl_3$**

Fonte: DAVIS, J. R. *Corrosion of weldments*. Ohio: ASM International, 2006.

### 2.2.3 Comportamento dos Aços Inoxidáveis Austeníticos em Meios Ácidos

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam comportamento distinto em meios ácidos, dependendo da natureza oxidante ou redutora do ambiente. Em ácidos oxidantes, como o nítrico ( $HNO_3$ ) e o fosfórico ( $H_3PO_4$ ), ocorre a formação ou manutenção do filme passivo de óxido de cromo ( $Cr_2O_3$ ), que protege o material contra ataques corrosivos. Essa camada passiva, mostrada na Figura 2-11, é essencial para garantir a resistência à corrosão, especialmente em condições moderadas de temperatura e concentração. (CARBÓ, 2008).

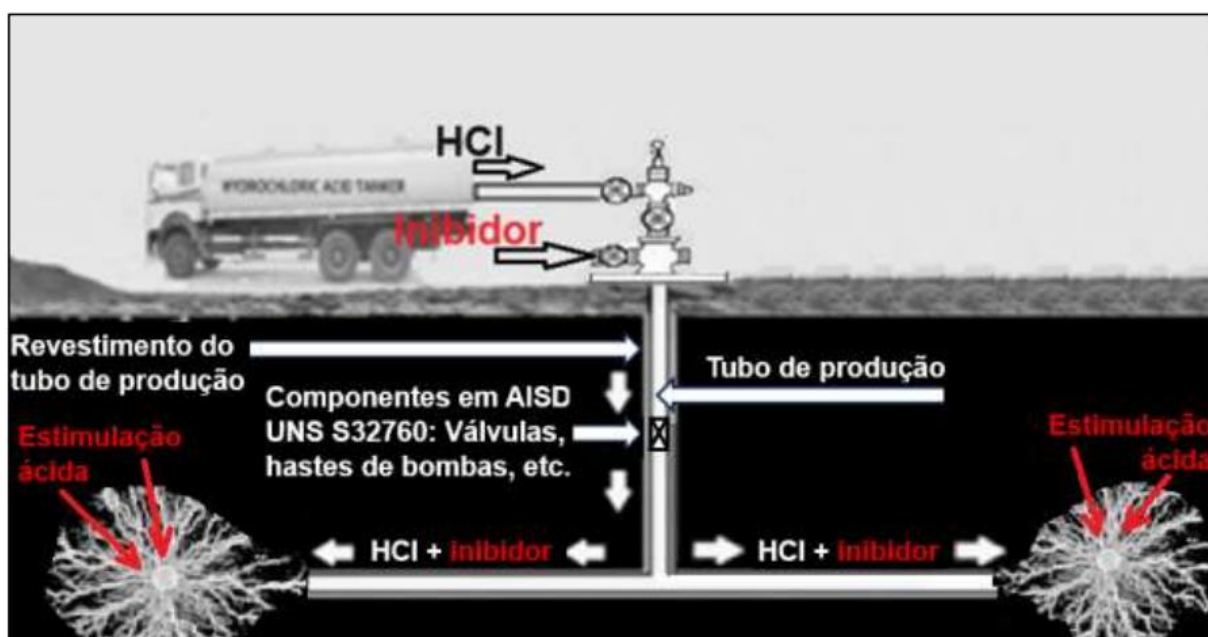


**Figura 2-11 - Corrosão dos aços inoxidáveis nos meios ácidos redutores.**  
**Fonte: Carbó, 2008**

Por outro lado, em meios ácidos redutores, como o clorídrico (HCl) e o fluorídrico (HF), a ausência de agentes oxidantes impede a formação ou regeneração do filme passivo, levando a um ataque generalizado e uniforme. Nesses casos, mesmo aços inoxidáveis como o AISI 304 e o AISI 316 sofrem corrosão acelerada, especialmente em temperaturas elevadas ou concentrações intermediárias. Em ácido sulfúrico, um ácido bastante redutor, aços inoxidáveis como o AISI 304 e o AISI 316 resistem somente em soluções muito diluídas ou muito concentradas e em baixas temperaturas. (CARBÓ, 2008)

No contexto da indústria de petróleo e gás, o uso de HCl em processos de estimulação ácida, ilustrada pela Figura 2-12, representa um desafio significativo para a integridade dos materiais. Durante a acidificação de poços, o HCl reage com rochas carbonatadas, aumentando a permeabilidade, mas também ataca tubulações e equipamentos metálicos. Aços inoxidáveis super duplex, são frequentemente empregados nessas aplicações devido à sua maior resistência em comparação com

aços carbono, mas ainda requerem proteção adicional, como inibidores de corrosão, para evitar danos. (MAINIER, 2018)



**Figura 2-12 - Processo de acidificação de poço onshore de petróleo.**  
 Fonte: Adaptação do autor (YASEEN e MANSOORI, 2020)

A corrosão em meios ácidos redutores ocorre através de reações eletroquímicas, onde o metal é oxidado ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ) e os íons de hidrogênio são reduzidos ( $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ ). Esse processo é particularmente agressivo em sistemas fechados, como tubulações de produção (Figura 2-13), onde a concentração de ácido e a temperatura podem variar significativamente. A seleção adequada de materiais e o uso de inibidores, como a tiouréia, são estratégias essenciais para mitigar esses efeitos e prolongar a vida útil dos equipamentos. (MAINIER, 2018).

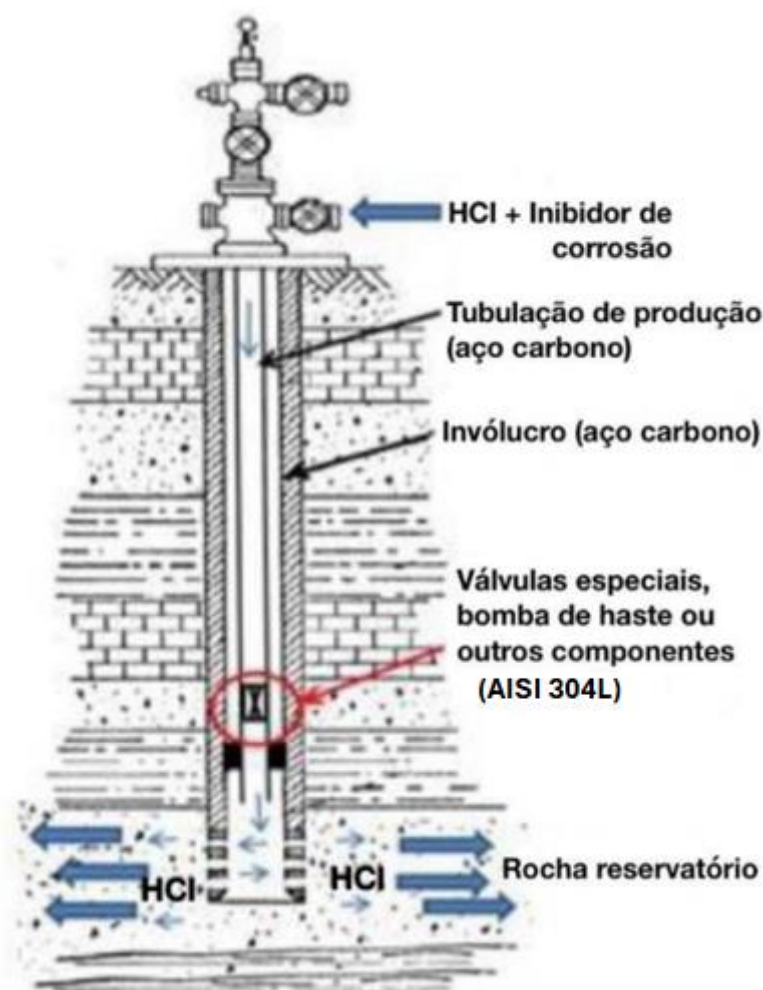


Figura 2-13 - Estimulação ácida de uma rocha reservatório.  
Fonte: Adaptação do autor (MAINIER, 2018)

### 2.3 INIBIDORES DE CORROSÃO

Os inibidores de corrosão são substâncias químicas que, quando adicionadas em pequenas concentrações a um meio agressivo, reduzem ou eliminam a taxa de degradação dos materiais metálicos. Seu mecanismo de ação baseia-se na interação com a superfície do metal, formando uma camada protetora que impede o contato direto com os agentes corrosivos ou alterando as reações eletroquímicas envolvidas no processo de corrosão (GENTIL, 2011). Essa proteção pode ocorrer através da adsorção de moléculas orgânicas, da formação de filmes passivantes ou da modificação do ambiente eletrolítico, tornando-o menos agressivo.

A eficácia dos inibidores está intimamente ligada à sua composição química e à natureza do meio corrosivo. Em sistemas onde predominam íons cloreto, como em

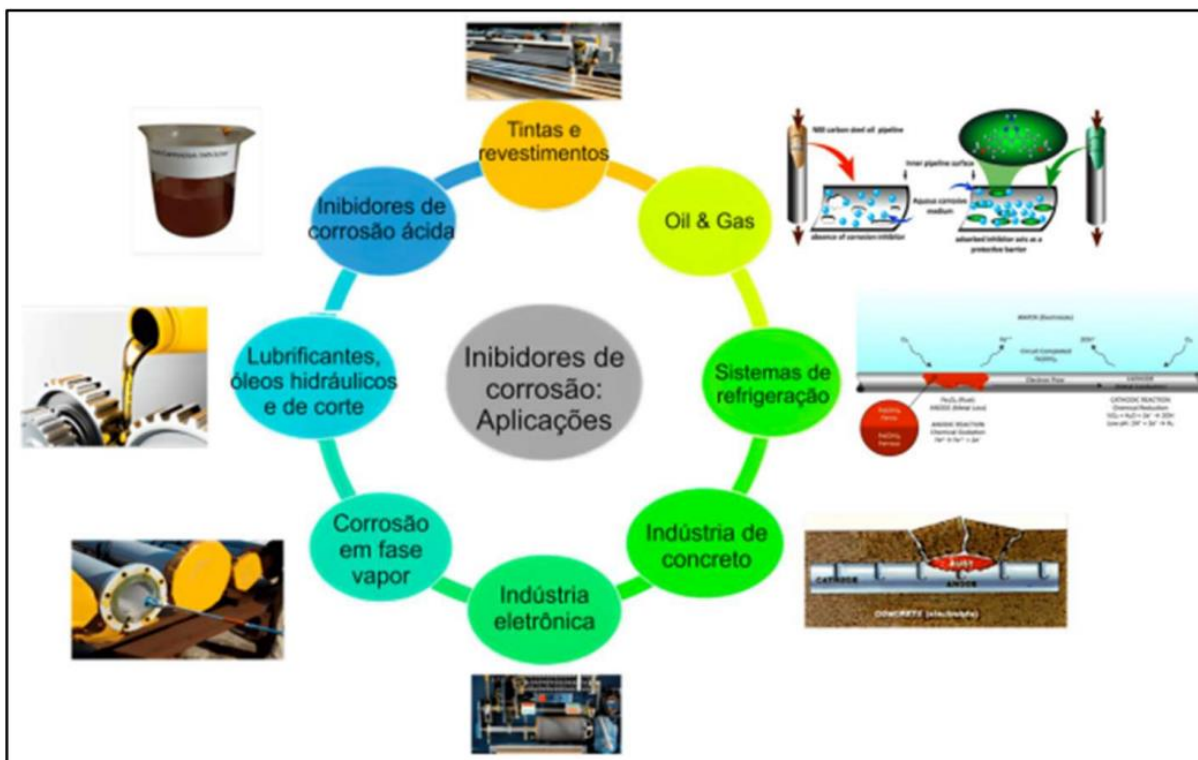
ambientes marinhos ou na indústria petroquímica, compostos contendo grupos funcionais específicos (como aminas, fosfonatos ou tióis) demonstraram capacidade de se adsorver preferencialmente em regiões suscetíveis à nucleação de pites, retardando o início do processo corrosivo (MUDALI e PUJAR, 2002). Estudos eletroquímicos, como curvas de polarização e espectroscopia de impedância, são essenciais para compreender esses mecanismos em nível molecular (MAINIER, 2020).

A escolha e o desenvolvimento de inibidores devem considerar não apenas seu desempenho técnico, mas também aspectos práticos como estabilidade em diferentes condições operacionais, compatibilidade com outros aditivos e impacto ambiental. Avanços recentes têm explorado o uso de inibidores "verdes", derivados de fontes naturais ou biodegradáveis, que oferecem proteção eficaz sem os riscos associados aos compostos tradicionais (KHATAK e BALDEV, 2006). Essa abordagem representa um equilíbrio entre a necessidade de proteção anticorrosiva e a sustentabilidade nos processos industriais.

### 2.3.1 Aplicação e Classificação dos Inibidores de Corrosão

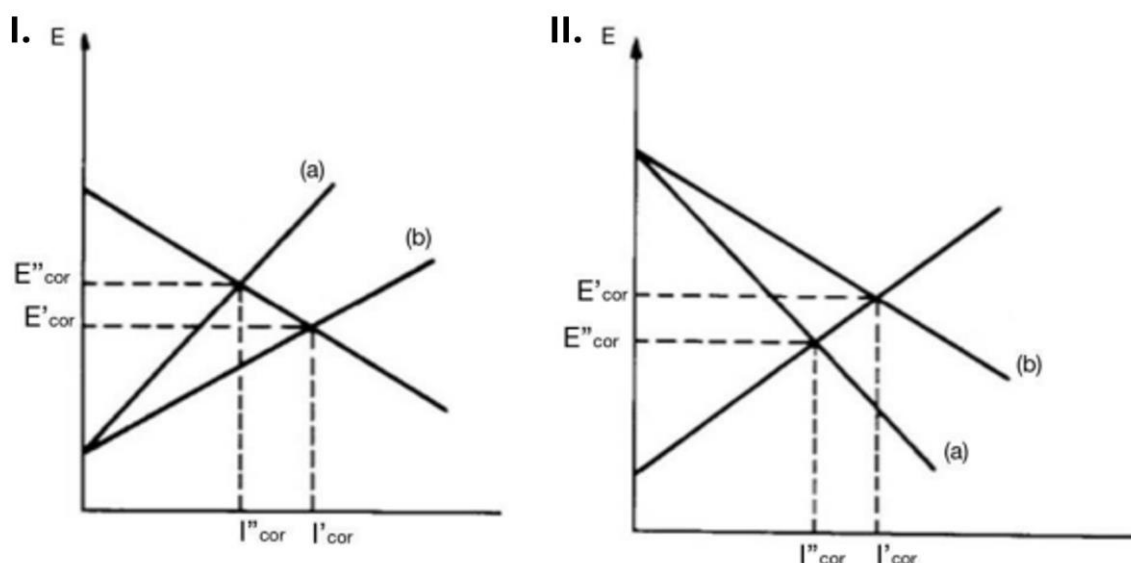
Os inibidores de corrosão são amplamente utilizados em diversos setores industriais, como mostra a Figura 2-14, incluindo petróleo e gás, infraestrutura, transporte e energia. Sua aplicação visa proteger componentes metálicos, como tubulações, estruturas offshore e maquinários, contra a degradação causada por ambientes agressivos. A seleção do inibidor adequado depende das condições operacionais, do tipo de material e do mecanismo de corrosão envolvido, sendo essencial compreender sua classificação para otimizar a eficácia protetora. (BIJAPUR, 2009).

Quanto à composição química, os inibidores são classificados em orgânicos e inorgânicos. Os orgânicos, como aminas, álcoois e tiouréia, contêm grupos funcionais (O, N, S) que se adsorvem à superfície metálica, formando uma barreira protetora. Já os inorgânicos, como cromatos e fosfatos, atuam através da formação de camadas passivas ou pela precipitação de compostos insolúveis. A tiouréia, por exemplo, é um inibidor orgânico que se destaca pela presença de enxofre e nitrogênio em sua estrutura molecular, facilitando a adsorção em meios ácidos. (GENTIL, 2011)



**Figura 2-14 - Aplicação de inibidores de corrosão.**  
**Fonte: Adaptação do autor (BIJAPUR, 2009)**

Os inibidores de corrosão, quanto ao comportamento eletroquímico, podem ser classificados como anódicos, catódicos ou por adsorção. Os anódicos, como os cromatos, atuam inibindo a oxidação do metal e elevando o potencial para valores mais nobres, exigindo concentrações adequadas para evitar corrosão localizada. Já os catódicos, como os hidróxidos, reduzem a reação catódica ao bloquear a redução do oxigênio ou a liberação de hidrogênio, promovendo polarização negativa do sistema. Por sua vez, os inibidores de adsorção, como a tiouréia, formam películas protetoras por interações químicas ou físicas com a superfície, sendo eficazes mesmo em baixas concentrações. A principal diferença entre os inibidores anódicos e catódicos está na alteração do potencial de corrosão: os anódicos deslocam o potencial para valores mais positivos, enquanto os catódicos para mais negativos, como ilustrado na Figura 2-15, onde a linha (a) indica a presença do inibidor e a linha (b) sua ausência, para ânodo e cátodo, respectivamente (Gentil, 2011).

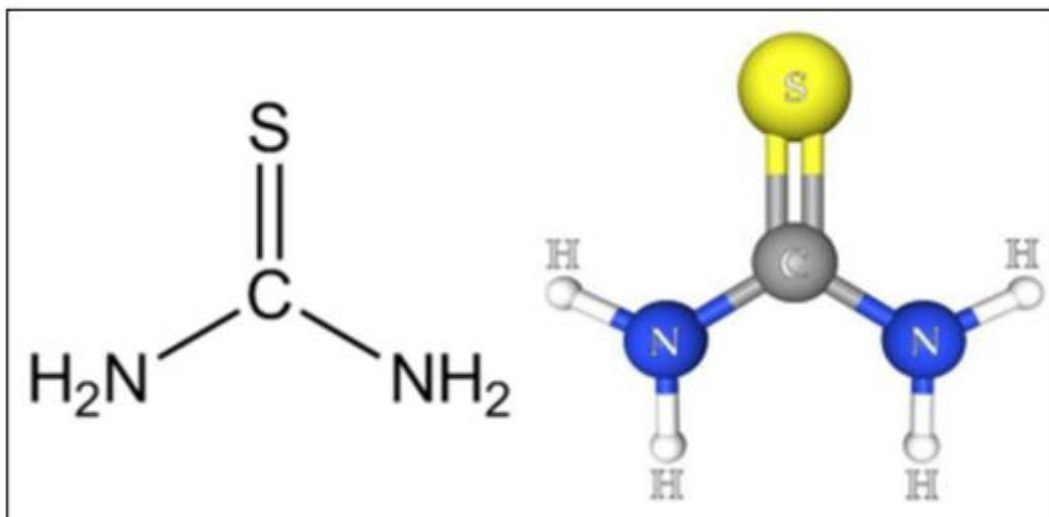


**Figura 2-15 - Diagrama de polarização: ação de inibidor (I) anódico (II) catódico.**  
**Fonte: Adaptação do autor (GENTIL, 2011)**

A eficácia dos inibidores é influenciada por fatores como temperatura, velocidade do fluido e concentração. Inibidores oxidantes, como os nitritos, promovem a passivação independentemente do oxigênio dissolvido, enquanto os não oxidantes dependem do meio para formar camadas protetoras. A escolha do inibidor ideal deve equilibrar desempenho técnico, custo e impacto ambiental, especialmente em setores como o petrolífero, onde a presença de contaminantes (ex.:  $\text{Cl}_2$ ) pode comprometer sua ação. (BIJAPUR, 2009).

### 2.3.2 Tiouréia e Derivados

A tiouréia ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ ), mostrada na Figura 2-16 a seguir, e seus derivados representam uma classe importante de inibidores de corrosão orgânicos, destacando-se por sua eficácia em meios ácidos. Sua estrutura molecular, caracterizada pela presença de átomos de enxofre (S) e nitrogênio (N), facilita a adsorção na superfície metálica, formando uma camada protetora que reduz significativamente a taxa de corrosão. (Oliveira et al., 2015).



**Figura 2-16 - Estrutura molecular da tiouréia.**

**Fonte:** Adaptação do autor (MAINIER et al., 2020; IVASHCHYSHYN et al., 2022)

Segundo SHEN (2006) e LOTO (2012), a tiouréia apresenta desempenho superior a inibidores à base de amina em ambientes ácidos, como soluções de HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e ácido fórmico. Essa eficiência é atribuída à capacidade de seus grupos funcionais de se ligarem à superfície do metal, bloqueando sítios ativos e impedindo a ação de espécies corrosivas. Testes em operações industriais, como decapagem e acidificação de poços de petróleo, confirmaram sua aplicabilidade prática.

A eficácia da tiouréia como inibidor é influenciada por fatores como concentração, temperatura e presença de contaminantes. Em soluções de HCl contaminadas com cloro (Cl<sub>2</sub>), observa-se uma redução na proteção oferecida pela tiouréia à medida que a concentração de cloro aumenta. Esse efeito é particularmente evidente em concentrações acima de 500 mg/L de Cl<sub>2</sub>, onde a competição por sítios de adsorção na superfície metálica diminui a eficiência do inibidor, ilustrado na Figura 2-17. (MAINIER, 2020).

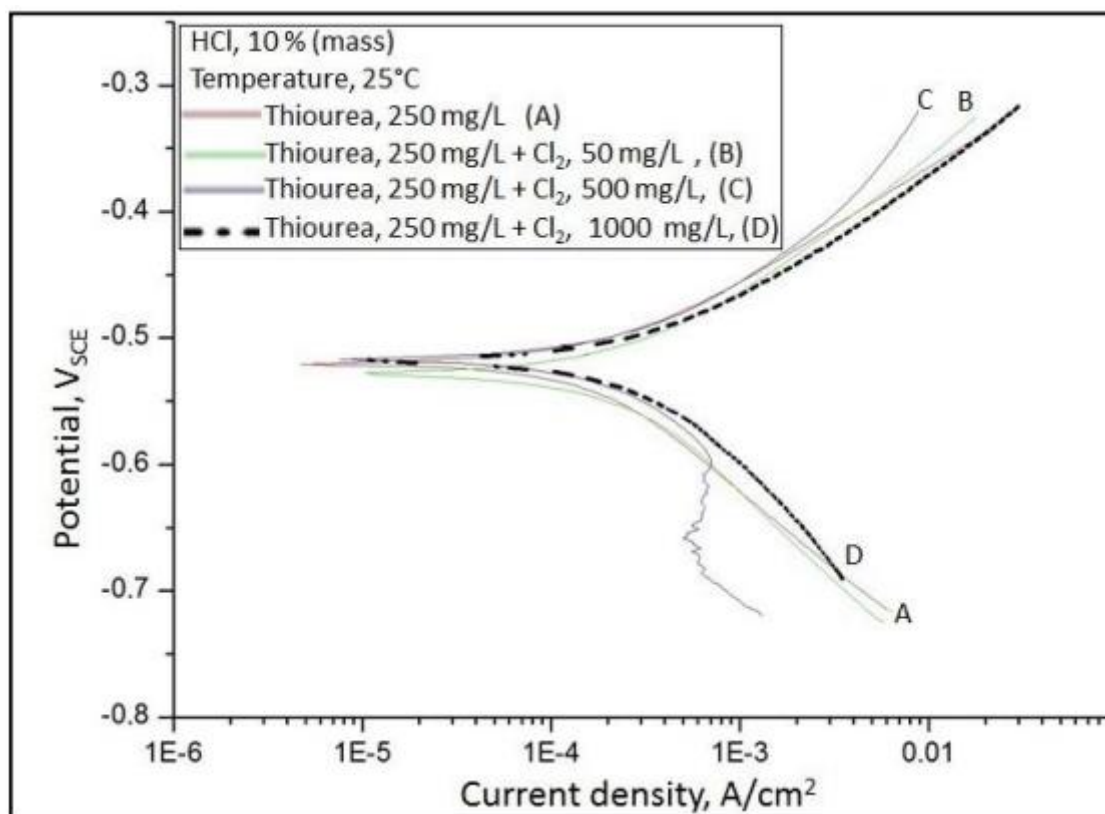
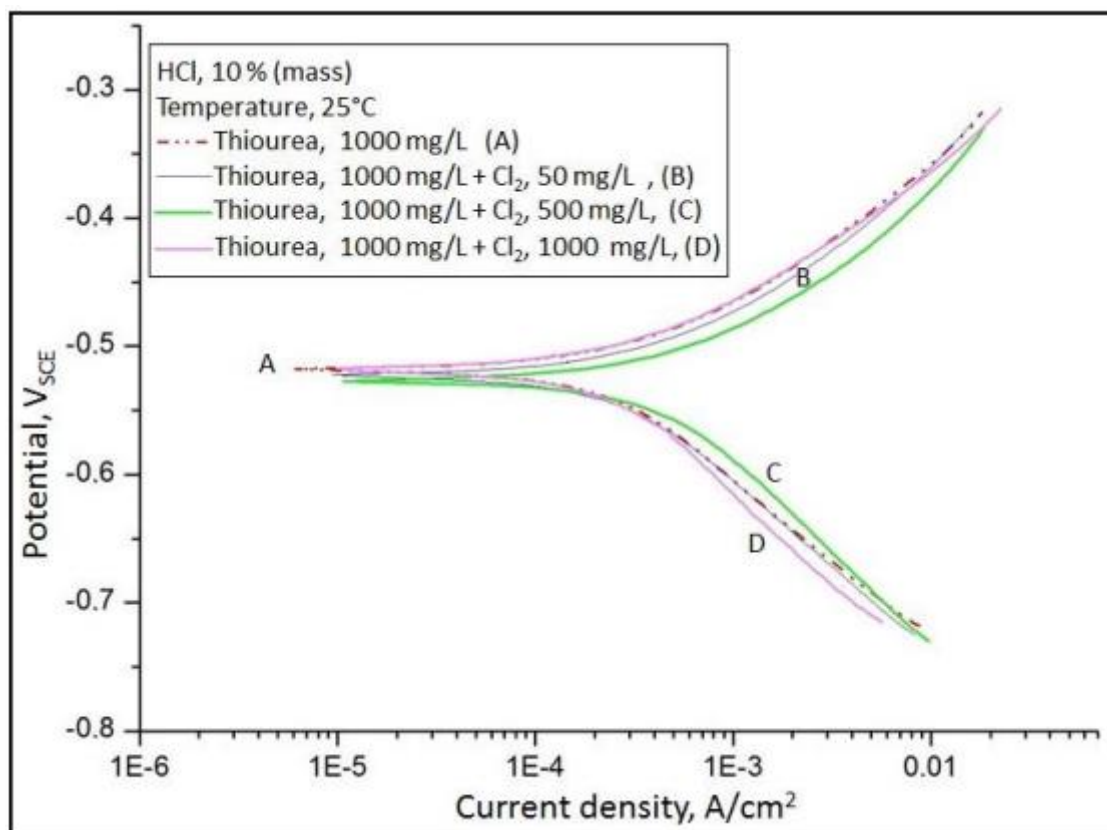


Figura 2-17 - Curvas de polarização do aço carbono em HCl 10% (em massa) com adições de tiouréia e cloro.

Fonte: International Journal of Advances in Engineering & Technology; 2020.

Além da tiouréia, derivados como os *tiadiazóis* têm ganhado atenção por sua baixa toxicidade e eficácia comparável, evidenciado pelas curvas na Figura 2-18. Esses compostos, que também contêm grupos tiocarbonilo, apresentam alta adsorção devido à sua estrutura plana e pares de elétrons livres em átomos de S e N. Sua compatibilidade com regulamentações ambientais os torna alternativas promissoras para substituir inibidores tradicionais mais tóxicos. (LOTO, 2012).



**Figura 2-18 - Curvas de polarização do aço carbono em HCl 10% (em massa) com adições de tiouréia e cloro**

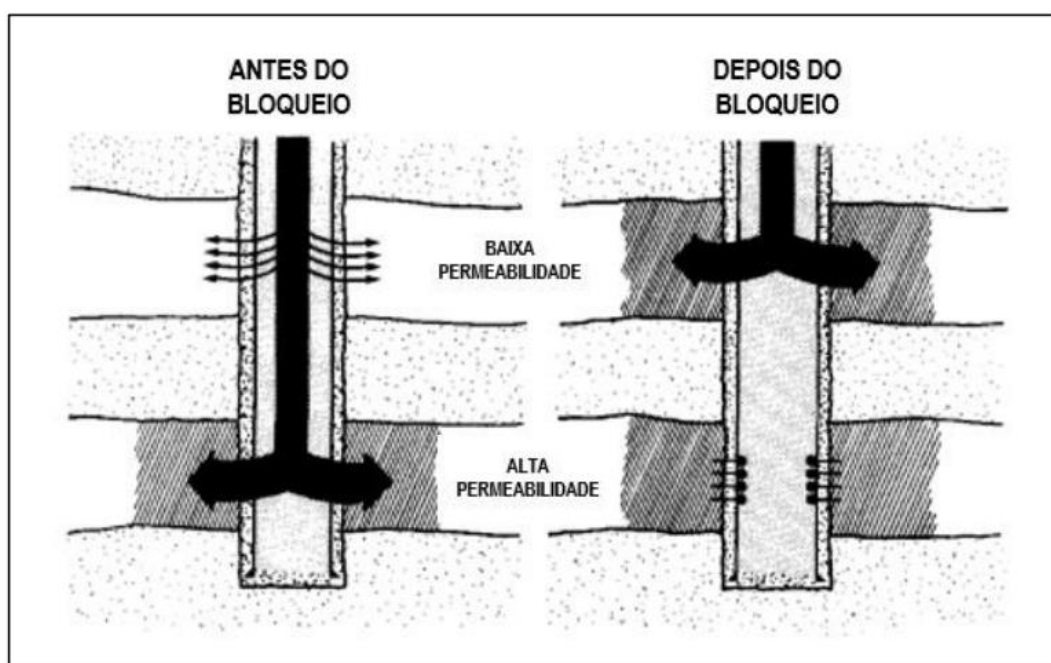
Fonte: International Journal of Advances in Engineering & Technology; 2020.

## 2.4 ESTIMULAÇÃO ÁCIDA DE POÇOS DE PETRÓLEO

A estimulação ácida é uma técnica de intervenção utilizada em poços de petróleo, preferencialmente naqueles que se encontram em estágios avançados de produção ou próximos ao fim de sua vida útil, com o objetivo de restaurar ou aumentar sua produtividade. Essa técnica consiste na injeção de soluções ácidas na formação rochosa para promover a dissolução de minerais ou de danos causados durante a perfuração, resultando no aumento da permeabilidade da matriz e facilitando o fluxo de hidrocarbonetos. O ácido clorídrico (HCl) é o agente mais amplamente utilizado nesse processo, devido à sua elevada reatividade e afinidade com rochas carbonatadas, permitindo uma desobstrução eficiente dos canais de fluxo no reservatório.

Em operações como estimulação ácida e outros tratamentos, por exemplo o “*Water Shutoff*”, é comum seguir etapas específicas antes e depois da injeção do fluido

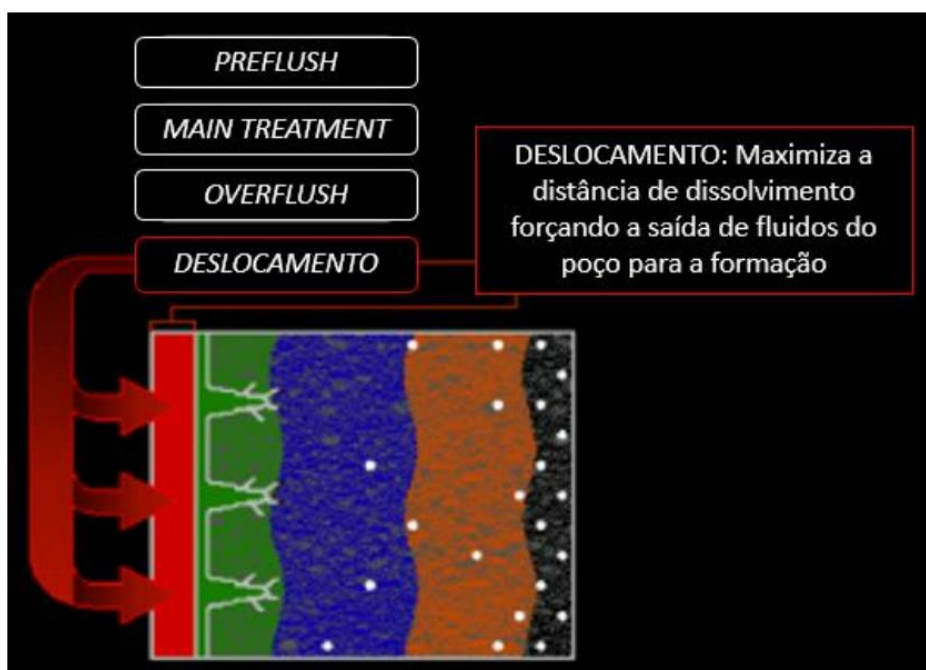
principal no reservatório. Essas fases funcionam como pré-camadas que condicionam a rocha para a intervenção ou como espaçadores que direcionam o fluido para zonas mais profundas. Na estimulação ácida, essas etapas são conhecidas como *Preflush*, *Main Treatment* e *Overflush*, podendo incluir diversos aditivos químicos, como surfactantes, estabilizadores de argila, inibidores de corrosão e agentes divergentes. Este último, geralmente aplicado no *Preflush*, atua bloqueando regiões já tratadas pelo ácido, forçando sua penetração em áreas menos permeáveis e ampliando a eficiência do contato entre poço e reservatório. Os agentes divergentes podem ser fluidos viscosos, polímeros, surfactantes viscoelásticos ou pequenas esferas selantes, conforme ilustrado na Figura 2-19 (Bybee, 2000).



**Figura 2-19 - Ação do agente divergente sobre a área tratada do reservatório.**  
**Fonte: Principle of Acid Stimulation; 1983.**

Cada etapa do tratamento é planejada conforme a capacidade de absorção da formação, definindo-se os volumes de ácido para cada fase com base nessa análise. O Preflush tem a função de preparar a rocha, reduzindo o pH e removendo incrustações carbonáticas. Quando há presença de sulfato de bário, utiliza-se um dissolvente específico durante o tratamento principal, pois os ácidos convencionais (HCl e HF) não conseguem dissolvê-lo. O Main Treatment concentra-se na eliminação do dano e na restauração da permeabilidade, enquanto o Overflush desloca o fluido para zonas mais profundas e previne precipitações secundárias. Em alguns casos, adiciona-se uma camada extra chamada Displacement, dedicada exclusivamente ao

empurramento do tratamento. A sequência dessas camadas está ilustrada na Figura 2-20 (Bybee, 2003; THIMAIAH, 2005).



**Figura 2-20 - Técnicas de Estimulação.**  
**Fonte: THIMAIAH; 2005**

Segundo Muecke (1983), seleção entre estimulação ácida e outras técnicas depende fundamentalmente das características do reservatório. A Tabela 2-2 de referência mostra claramente como formações com permeabilidade moderada a alta são candidatas ideais para acidificação matricial. Esta informação técnica é essencial para os engenheiros tomarem decisões fundamentadas sobre o método de intervenção mais adequado. Sendo  $k$  a permeabilidade e mD Milidarcy (medida de permeabilidade).

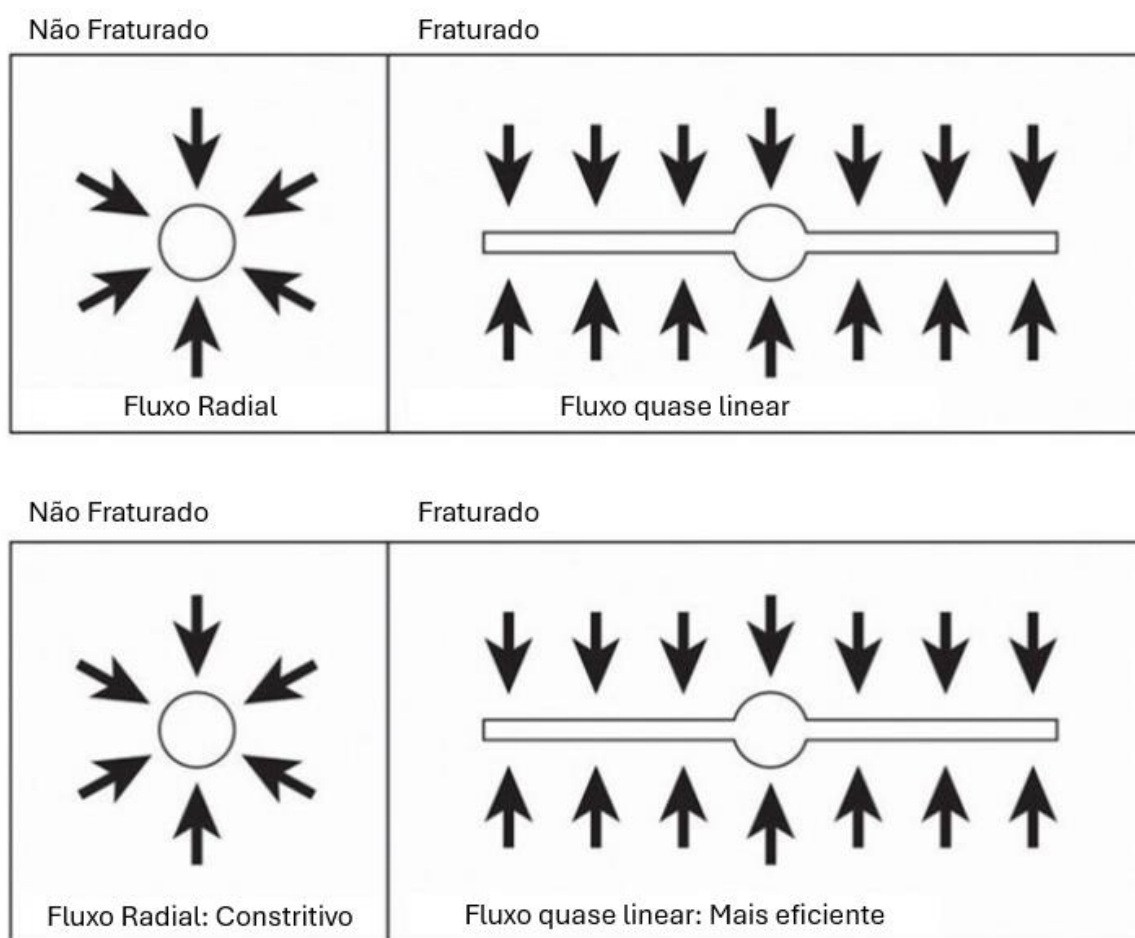
**Tabela 2-2 - Tabela comparativa de permeabilidade efetiva de reservatórios.**

| Permeabilidade | Gás                                 | Óleo                               |
|----------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Baixa          | $k < 0,5 \text{ mD}$                | $k < 5 \text{ mD}$                 |
| Moderada       | $0,5 \text{ mD} < k < 5 \text{ mD}$ | $5 \text{ mD} < k < 50 \text{ mD}$ |
| Alta           | $k > 5 \text{ mD}$                  | $k > 50 \text{ mD}$                |

**Fonte: Economides; 2011**

Os resultados operacionais comprovam a eficácia da técnica quando bem aplicada. A ilustração (Figura 2-21) comparativa entre fluxo radial e linear demonstra como a estimulação ácida pode modificar benéficamente o padrão de fluxo próximo

ao poço. Casos de campo documentados mostram aumentos significativos de produtividade, que variam conforme as condições específicas de cada reservatório.



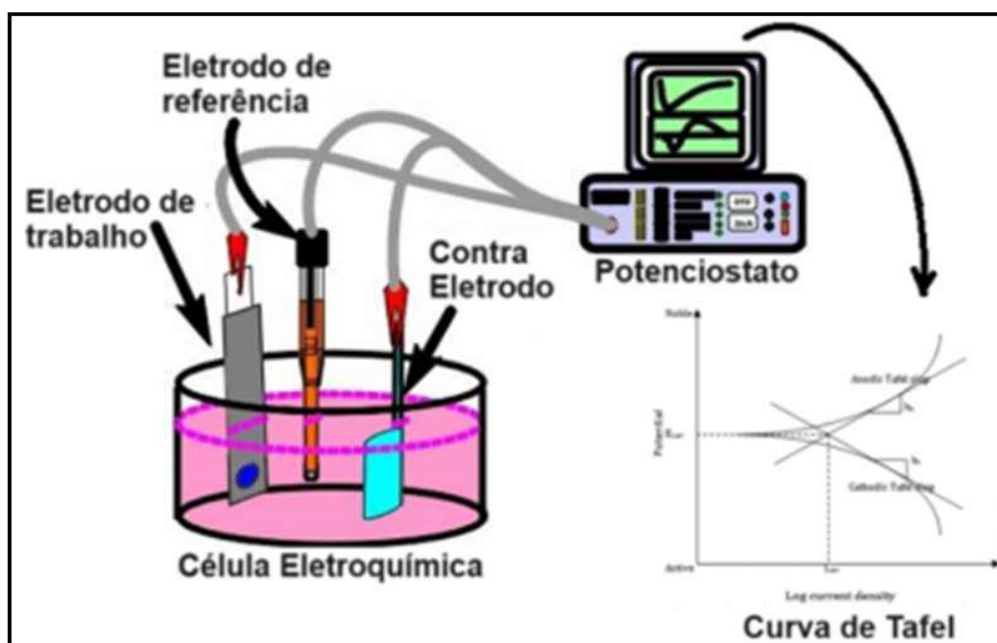
**Figura 2-21 - Alteração de fluxo gerada pelo fraturamento.**  
**Fonte: DANESHY; 2010**

O uso de agentes divergentes representa um avanço importante na técnica. Estes compostos garantem uma distribuição mais uniforme do ácido, direcionando o tratamento para as zonas menos permeáveis que mais necessitam de intervenção. Este refinamento tem permitido alcançar resultados ainda mais consistentes em operações de estimulação. (DANESHY, 2010).

## 2.5 ENSAIO DE POLARIZAÇÃO

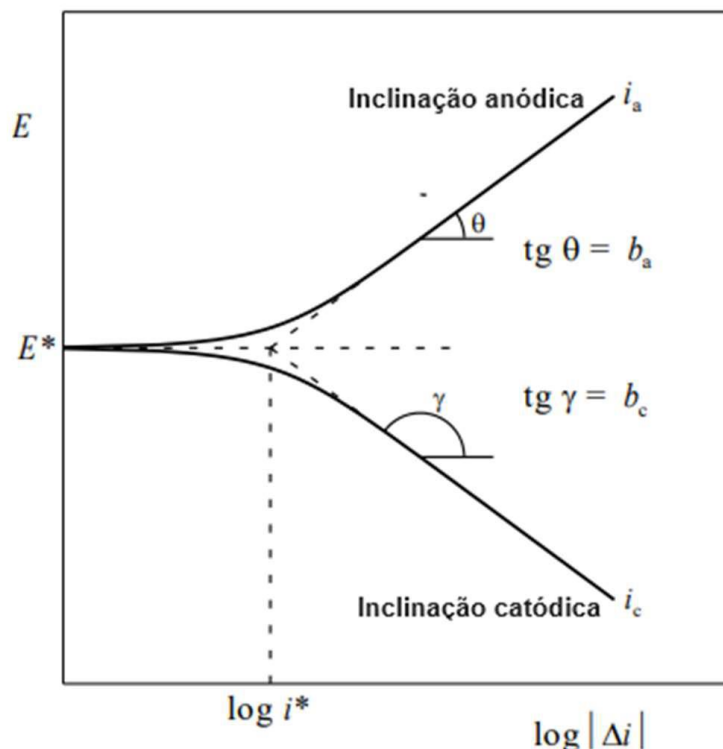
O ensaio de polarização potenciodinâmica, evidenciado na Figura 2-22, constitui uma importante ferramenta eletroquímica para investigação do

comportamento corrosivo de materiais metálicos. Este método, padronizado pela norma ASTM G102-23, permite a obtenção de parâmetros quantitativos essenciais para avaliação da resistência à corrosão e previsão da durabilidade de ligas metálicas em ambientes agressivos. O princípio fundamental baseia-se na aplicação de um potencial controlado entre o eletrodo de trabalho e o contraeletrodo, enquanto se mede a resposta da corrente resultante, gerando curvas que revelam os mecanismos eletroquímicos envolvidos no processo corrosivo. (Wolyneec 2003).



**Figura 2-22 - Ensaio eletroquímico (polarização).**  
**Fonte: (BRANDT et al., 2008)**

A análise das curvas de polarização permite a determinação de parâmetros críticos através da extrapolação das retas de Tafel. Entre esses parâmetros destacam-se a densidade de corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ), o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e as inclinações anódica ( $b_a$ ) e catódica ( $b_c$ ) de Tafel. A densidade de corrente de corrosão, em particular, representa um indicador direto da velocidade do processo corrosivo, sendo fundamental para o cálculo das taxas de corrosão. A Figura 2-23 que ilustra esquematicamente as inclinações das retas de Tafel fornece uma compreensão visual clara desses conceitos fundamentais.



**Figura 2-23 - Inclinação das retas de Tafel.**  
**Fonte: (WOLYNEC, 2003)**

O cálculo da taxa de corrosão é realizado através da Equação 2-1:

$$\text{Equação 2-1 } CR = \frac{k \times i_{corr} \times EW}{\rho} \quad (2-1)$$

Onde K representa uma constante de conversão ( $3,27 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{g} / \mu \text{ A} \cdot \text{cm} \cdot \text{ano}$ ), EW é o peso equivalente da liga e  $\rho$  sua densidade.

O peso equivalente, calculado considerando apenas elementos com mais de 1% em massa, leva em conta a valência e fração de massa de cada elemento da liga. Esta abordagem permite converter dados eletroquímicos em taxas de penetração práticas (mm/ano), facilitando a interpretação dos resultados para aplicações industriais. O peso equivalente pode ser calculado como na Equação 2-2:

$$\text{Equação 2-2 } EW = \frac{1}{\sum \frac{n_i \times f_i}{W_i}} \quad (2-2)$$

Onde  $n_i$  é a valência dos elementos da liga metálica,  $f_i$  é a fração de massa dos elementos da liga metálica e  $W_i$  equivale a massa atômica dos elementos da liga metálica (g/mol). (ASTM G102, 2023).

A norma NACE SP0775 (2013) estabelece uma classificação qualitativa das taxas de corrosão, categorizando-as conforme a Tabela 2-3, abaixo. Esta

classificação é particularmente útil para a indústria de petróleo e gás, permitindo uma avaliação rápida da corrosividade em sistemas de produção.

**Tabela 2-3 - Classificação da taxa de corrosão em milímetros por ano.**

| CLASSIFICAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO E, SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO |                                 |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Corrosividade                                                         | Taxa média de corrosão (mm/ano) |
| Baixa                                                                 | <0,025                          |
| Moderada                                                              | 0,025 a 0,12                    |
| Alta                                                                  | 0,13 a 0,25                     |
| Severa                                                                | >0,25                           |

**Fonte: Adaptação do autor (NACE SP0775, 2013)**

Adicionalmente, o ensaio possibilita o cálculo da eficiência de inibição de corrosão ( $E_e$ ), comparando densidades de corrente em soluções com e sem inibidores, oferecendo valiosa informação para desenvolvimento de formulações protetoras. Da forma que é exibido na Equação 2-3:

$$\text{Equação 2-3 } E_e = \left( \frac{I_{corr_s} - I_{corr_c}}{I_{corr_s}} \right) \times 100 \quad (2-3)$$

Onde  $I_{corr_s}$  e  $I_{corr_c}$  são os valores de densidade de corrente de corrosão em soluções sem inibidor e com inibidor de corrosão, respectivamente. (Radojčić, 2008)

A implementação prática do ensaio requer cuidados especiais na preparação dos eletrodos, montagem da célula eletroquímica e preparação das soluções de ensaio. O uso de eletrodos de referência apropriados é crucial para garantir medições precisas do potencial, enquanto o controle rigoroso das condições experimentais assegura a reprodutibilidade dos resultados. A versatilidade deste método o torna aplicável desde estudos fundamentais de mecanismos de corrosão até o controle de qualidade de materiais em ambientes industriais específicos.

## 2.6 ENSAIO POTENCIODINÂMICO CÍCLICO

O ensaio eletroquímico para determinação de suscetibilidade à corrosão por pites é comumente realizado por meio da técnica de polarização potenciodinâmica cíclica, conforme estabelecido na norma ASTM G-61 (2009). Esse método consiste

em aplicar uma varredura de potencial sobre o eletrodo de trabalho, partindo do potencial de circuito aberto (OCP) em direção a valores mais positivos, até atingir uma corrente limite. Em seguida, a varredura é invertida, formando um laço de histerese no voltamograma. A análise desse laço permite identificar o comportamento do material frente à corrosão localizada, especialmente em meios contendo íons cloreto.

A determinação do potencial de pite ( $E_{PITE}$ ) é realizada por meio da análise do gráfico de densidade de corrente em função do potencial aplicado (Figura 2-24). Normalmente, o valor de  $E_{PITE}$  é identificado no ponto em que ocorre um aumento abrupto na densidade de corrente, indicando o início da formação de pites. Já o potencial de repassivação ( $E_{REP}$ ) é obtido a partir do ponto de interseção entre as curvas de varredura anódica e catódica, representando o momento em que o material volta a se passivar após a ocorrência da corrosão localizada.

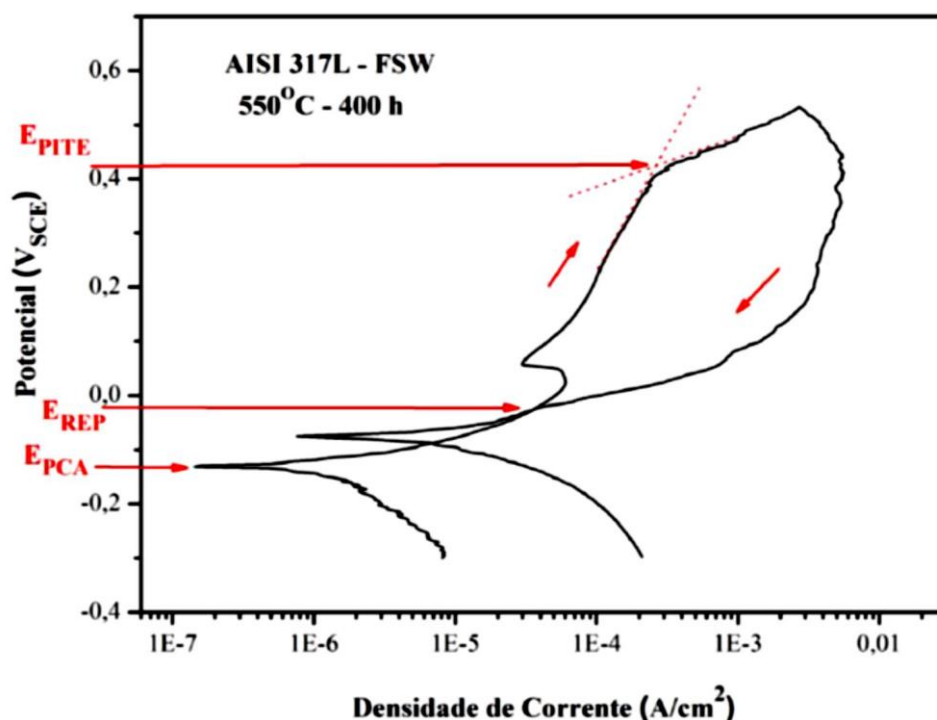


Figura 2-24 - Curva da análise de corrosão por pites.  
Fonte: Farneze; 2016

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, é apresentada a composição química e o aspecto microestrutural do aço utilizado nas análises, bem como as metodologias, as etapas e a instrumentação requerida para a realização dos ensaios de corrosão e microscopia ótica.

#### 3.1 MATERIAL

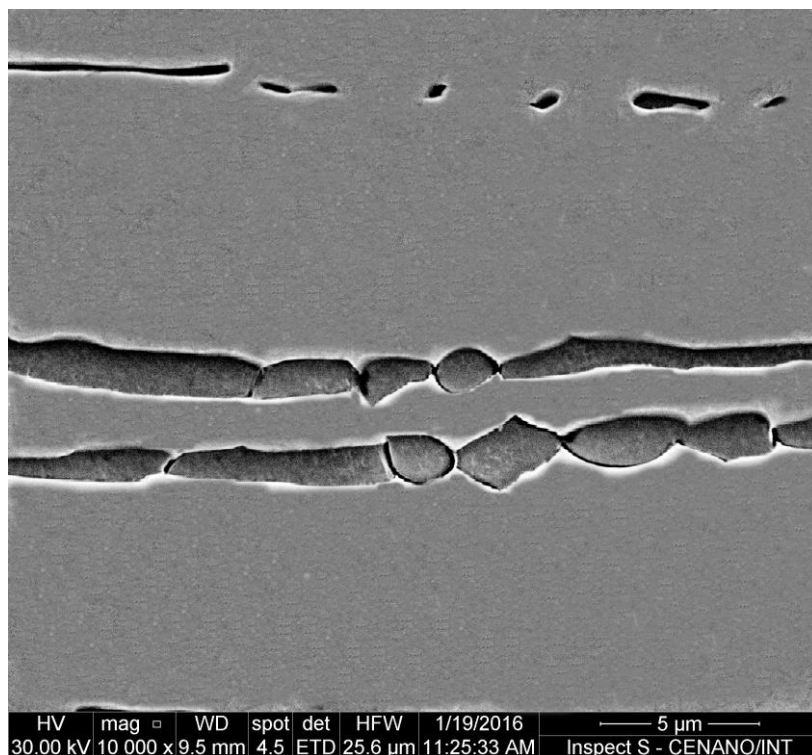
Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas as amostras do trabalho de Farneze (2016), são estas provenientes de chapas do aço inoxidável austenítico AISI 317L. A Tabela 3-1 apresenta a composição química do material de estudo, através da análise química por espectrometria de emissão ótica.

**Tabela 3-1 - Composição química do metal base (% em peso).**

| C     | Mn   | Si   | S     | P     | Cr    | Ni    | Mo   |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 0,024 | 1,34 | 0,47 | 0,003 | 0,031 | 18,13 | 11,41 | 3,02 |

**Fonte: Adaptação do Autor (Farneze; 2016)**

A Figura 3-1, de Farneze (2016), exibe a microestrutura do AISI 317L do material como recebido, por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Observa-se que a microestrutura do material consiste em austenita ( $\gamma$ ) e ferrita ( $\delta$ ), isenta da precipitação de fases intermetálicas.



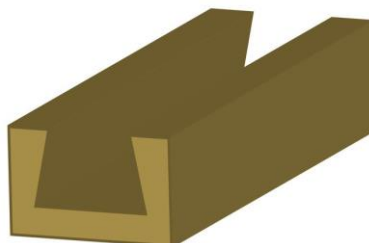
**Figura 3-1 - Imagem obtida por MEV da microestrutura do aço AISI 317L.  
Ataque: Behara (FARNEZE, 2016).**

### 3.2 ENSAIOS DE CORROSÃO

#### 3.2.1 Preparação dos Eletrodos de Trabalho (ET)

Para início da preparação, foram cortadas a partir de uma chapa de aço inoxidável Austenítico 317L, foram cortados três corpos de prova com 12 mm x 12 mm com 8 mm de espessura. Para o corte foi utilizada uma cortadora metalográfica COR-80, da Arotec, pertencente ao Laboratório de Materiais do CEFET/RJ (LAMAT).

Todos os corpos de prova que compuseram os ET foram inicialmente preparados para permitir o contato elétrico entre a amostra e um dos terminais do potenciostato, por meio da união entre corpo de prova e condutor elétrico (fio rígido de cobre, seção 2,5mm<sup>2</sup>). Com isso, os metais base foram levados a uma morsa e uma serra para metal foi utilizada para abrir um canal em uma das faces das amostras, o propósito desse canal era comportar o fio ligado diretamente ao metal, para facilitar uma posterior leitura de dados nos ensaios. O perfil aproxima-se do mostrado a seguir, denominado *Rabo de Andorinha* (Figura 3-2) no qual uma canaleta mais estreita impede que o fio se desprenda da amostra com facilidade.

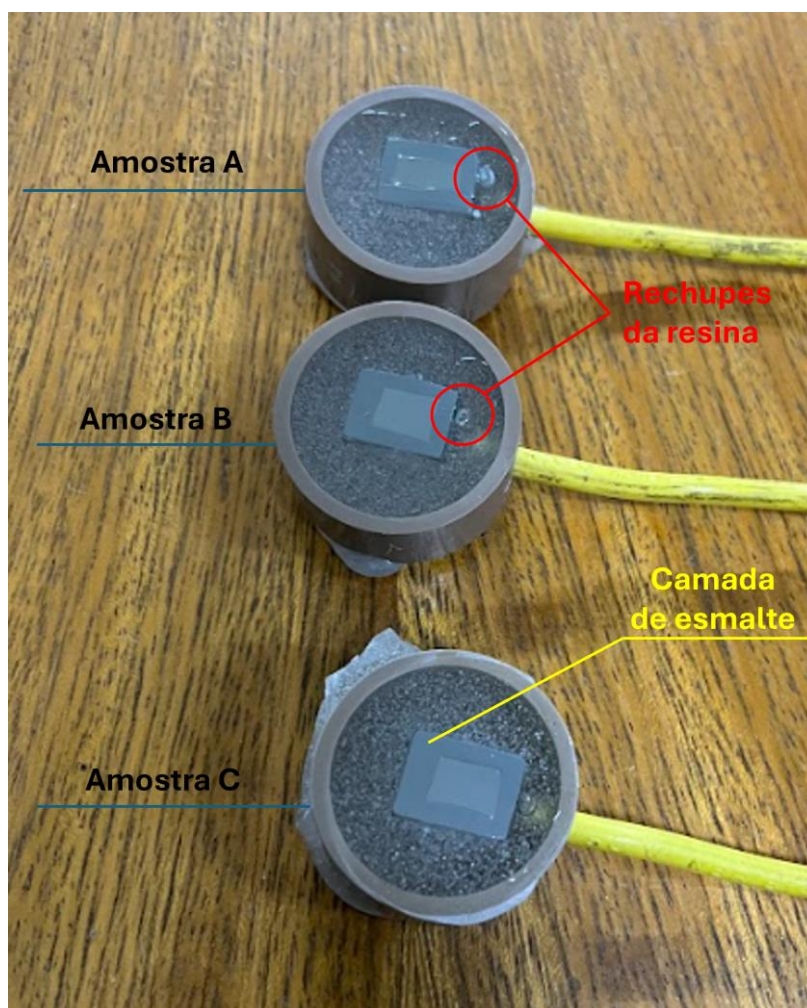


**Figura 3-2 - Exemplo de Rabo de Andorinha.**  
**Fonte: Colar.com**

Em seguida, as amostras foram devidamente alocadas em um segmento de tubulação de PVC, onde foram embutidas em uma solução composta de resina acrílica e catalisador. Por fim, uma vez confeccionados, os ET foram submetidos a um procedimento de acabamento superficial por meio da utilização de lixas rotativas de 100, 200, 320, 400, 500, 600 e 1200 Grit. Nesse trabalho, optou-se por também polir as amostras a serem submetidas aos ensaios de corrosão, com uma solução aquosa de alumina 1  $\mu\text{m}$ . Esse polimento foi feito com o objetivo de se obter superfícies mais homogêneas, sem riscos, para que a análise microscópica investigativa, em busca de possíveis pites, seja feita com melhor qualidade. A interface entre a resina e a amostra foi cuidadosamente recoberta com esmalte incolor, com a intenção de evitar corrosão por frestas, selecionando sempre uma área de exposição no centro da superfície da amostra, conforme mostrado na Figura 3-3. Como possível consequência natural do embutimento, duas das amostras (B e C) apresentaram pequenos pontos de bolhas na resina adjacente as faces expostas. Com isso, foi necessário reforçar a camada de esmalte nas áreas com discontinuidades, para evitar quaisquer interferências nos resultados de cada ensaio subsequente (Figura 3-4). Após o procedimento com o esmalte, foi feita a medição da área exposta da amostra, com o auxílio de um paquímetro.



**Figura 3-3 - Amostras Embutidas.**  
Fonte: Autoral; 2025



**Figura 3-4 - Indicação de amostras e camada de esmalte.**  
Fonte: Autoral; 2025

### 3.2.2 Soluções Eletrolíticas Utilizadas nos Ensaios

Nos ensaios de corrosão realizados neste trabalho, foram utilizadas soluções eletrolíticas com 5% de HCl (% em volume), escolhida por ser a condição usual no contexto de estimulação ácida, que costuma variar entre 5% e 15%. A tiouréia foi utilizada como inibidor de corrosão, variando as concentrações presentes nas soluções eletrolíticas, sendo elas, 0 mg/L, 250 mg/L e 500 mg/L, escolhida com base em outros estudos, como mostra Barbosa (2023) e Braga (2012), e por serem concentrações amplamente utilizadas pelo mercado. Desta forma, em cada tipo de ensaio foram avaliadas três condições diferentes.

Com a intenção de facilitar a identificação das amostras, as mesmas foram marcadas de acordo com a concentração de inibidor de corrosão que cada amostra teria presente dentro dos seus ensaios. Dessa forma, este trabalho identificou as amostras como A, B e C, conforme apresentado na Tabela 3-2.

**Tabela 3-2 - Identificação das Amostras.**

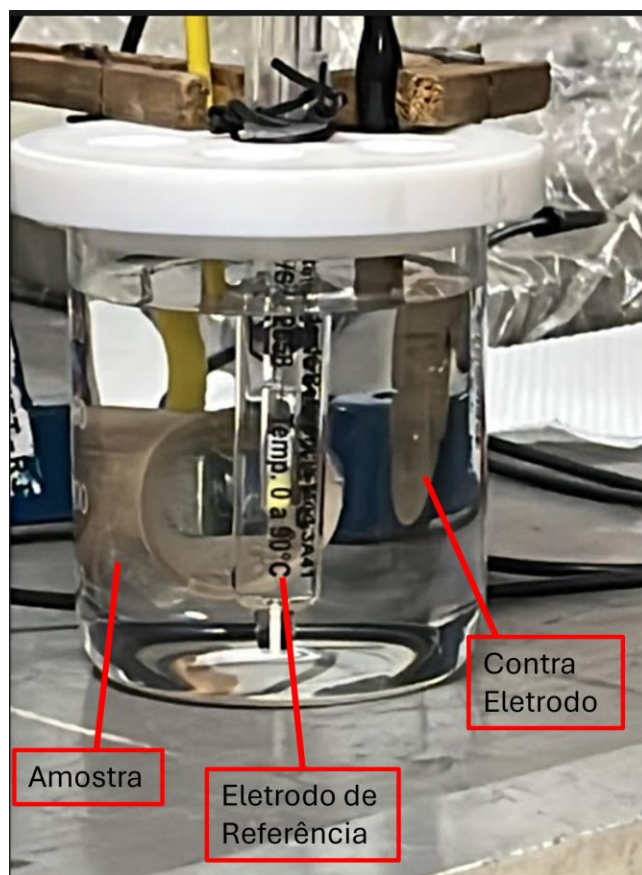
| <b>Amostra</b> | <b>Concentração de Inibidor</b> |
|----------------|---------------------------------|
| A              | Sem Tiouréia                    |
| B              | Com Tiouréia 250 mg/L           |
| C              | Com Tiouréia 500 mg/L           |

**Fonte: Autoral; 2025**

### 3.2.3 Ensaio de Polarização

Os ensaios de polarização foram realizados no Laboratório de Materiais do CEFET/RJ (LAMAT), conforme as normas ASTM G3-89 (1999) e ASTM G5-14 (2014), na temperatura ambiente (25°C). A célula eletroquímica empregada consistiu em um eletrodo de trabalho (ET), um contra eletrodo de platina e um eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS), conforme apresenta a Figura 3-5. Os eletrodos de trabalho foram preparados conforme a descrição no item 3.2.1. A célula eletroquímica foi mergulhada em uma solução ácida com inibidor, quando aplicado, conforme descrito no item 3.2.2. Para realização dos ensaios de polarização, foi utilizado um

potenciostato galvanistato marca Autolab, modelo PGSTAT204, acoplado a um computador e controlado pelo *software* NOVA 2.1 (Figura 3-6).



**Figura 3-5 - Componentes da célula eletrolítica.**  
Fonte: Autoral; 2025.



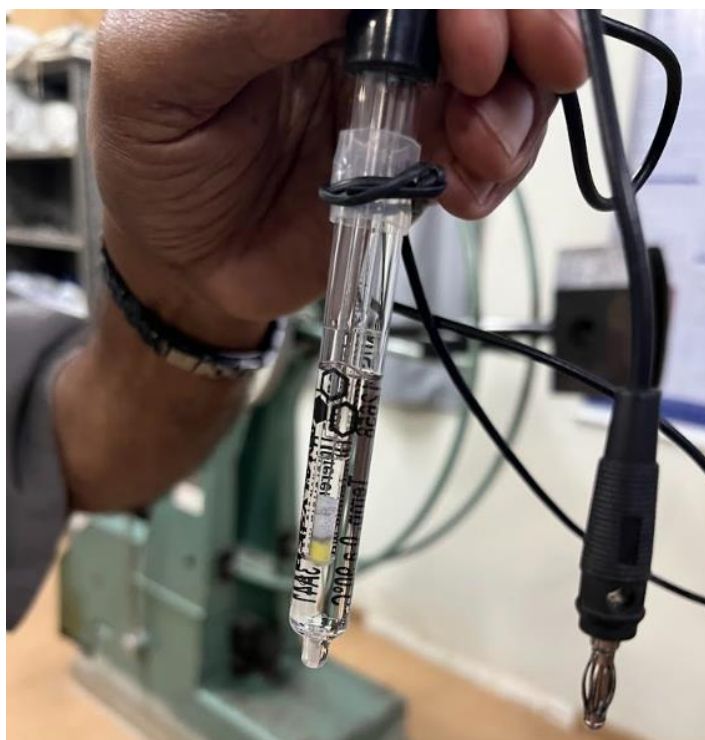
**Figura 3-6 – Software e potenciostato usados para captura de dados.**  
Fonte: (METROHM, 2025)

A solução aquosa ácida contida no béquer estabelece o meio condutor necessário para permitir a transferência de elétrons entre o eletrodo de trabalho (amostras metálicas) e o eletrodo de referência. Nesse contexto, o eletrólito desempenha papel de condutor iônico, possibilitando o fechamento do circuito eletroquímico entre os corpos anódicos e catódicos. Essa condução viabiliza o fluxo

de corrente elétrica e promovendo corrosão e gerando os dados necessários para o programa citado anteriormente.

Para a realização deste ensaio, foi preparada uma solução de 600 mL contendo 5% de HCl, com o objetivo de garantir volumes iguais para cada ensaio. A tiouréia, utilizada como inibidor de corrosão, foi adicionada individualmente em cada béquer contendo a solução ácida.

Para pleno funcionamento da célula eletroquímica, deve-se ter um eletrodo de referência, como citado anteriormente. Dessa maneira, foi utilizado um eletrodo de calomelano saturado (ECS) que age para fornecer um referencial estável fixa para permitir o monitoramento do potencial das amostras de trabalho (Figura 3-7).



**Figura 3-7 - Eletrodo de calomelano utilizado.**  
Fonte: Autoral; 2025

Por fim, o contra eletrodo de platina foi utilizado, devido a sua natureza inerte, na solução ácida utilizada, esse material não sofre corrosão e, portanto, não influencia nos resultados obtidos. O contra eletrodo está ligado ao potenciostato para medir o fluxo de corrente entre os outros dois corpos presentes no eletrólito (amostra analisada e eletrodo de referência).

Dessa forma, com todos os componentes em ordem para a obtenção das curvas de polarização anódica e catódica, foi necessário estabilizar o potencial de

circuito aberto ( $E_{PCA}$ ) do eletrodo de trabalho em cada ensaio. O tempo estabelecido para a estabilização do sistema foi de 20 minutos, garantindo condições adequadas para a coleta dos dados eletroquímicos. Todos os ensaios foram feitos sem agitação da solução ou do eletrodo. A velocidade de varredura utilizada no ensaio foi de 1 mV<sub>SCE</sub>/s. Como input do sistema Nova 2.1, o operador precisa indicar as áreas dos metais base expostas ao eletrólito, conforme apresentado na Tabela 3-3.

As curvas de polarização foram feitas com o intuito de verificar a eficiência inibidora do meio estudado para o aço inoxidável AISI 317L, por meio da diminuição ou aumento das medidas de densidades de corrente quando comparadas às do sistema aquoso de 5% (% em volume) de HCl e a valores de potencial diferentes do  $E_{corr}$ . A obtenção da densidade de corrente foi feita pelo método de extrapolação de Tafel, e é determinada pelo valor encontrado na interseção das retas traçadas na curva anódica e catódica.

**Tabela 3-3 - Relação de áreas no ensaio de polarização.**

| <b>Amostra</b> | <b>Área no ensaio de polarização (<math>cm^2</math>)</b> |
|----------------|----------------------------------------------------------|
| A              | 0,4                                                      |
| B              | 0,4                                                      |
| C              | 0,36                                                     |

**Fonte: Autoral, 2025.**

### 3.2.4 Ensaio Potenciodinâmico Cíclico

O ensaio de polarização potenciodinâmica cíclica foi realizado conforme a norma ASTM G 61, permitindo determinar o potencial de pites ( $E_{pite}$ ) e o intervalo de passivação, que é representado pela diferença entre o potencial de pite e o potencial de circuito aberto ( $E_{pite} - E_{PCA}$ ). A montagem da célula foi feita da mesma forma descrita no item 2.5, também utilizado as mesmas combinações de soluções eletrolíticas apresentadas no item 3.2.2, mantidas à temperatura ambiente (25°C). Os eletrodos de trabalho foram preparados conforme a descrição no item 3.2.1.

A varredura se iniciou a partir do potencial de circuito aberto ( $E_{PCA}$ ), com uma taxa de 1mV<sub>SCE</sub>/s. O potencial foi revertido ao ser atingida a densidade de corrente de

1mA/cm<sup>2</sup>. O *software* deu como resultado os dados da variação do potencial e da corrente. Esses dados foram tratados, de modo a se obter a densidade de corrente, e o módulo do potencial, garantindo apenas o uso de valores positivos. Para a determinação do potencial de pite ( $E_{\text{pite}}$ ), foi traçado um gráfico da densidade de versus potencial. Geralmente o potencial de pites é dado no ponto em que há um aumento abrupto da densidade de corrente, conforme apresentado no item 2.6.

Novamente, o parâmetro de área é necessário como input antes do ensaio. A diferença de áreas se dá devido ao novo lixamento e polimento dos eletrodos de trabalho (ET), acarretando uma nova aplicação da camada de esmalte nas bordas das amostras, podendo a mesma amostra variar entre si. Os dados para cada amostra são apresentados na Tabela 3-4.

**Tabela 3-4 - Área de exposição no ensaio potenciodinâmico cíclico.**

| <b>Amostra</b> | <b>Área no ensaio de pites (cm<sup>2</sup>)</b> |
|----------------|-------------------------------------------------|
| A              | 0,45                                            |
| B              | 0,32                                            |
| C              | 0,42                                            |

**Fonte: Autoral; 2025**

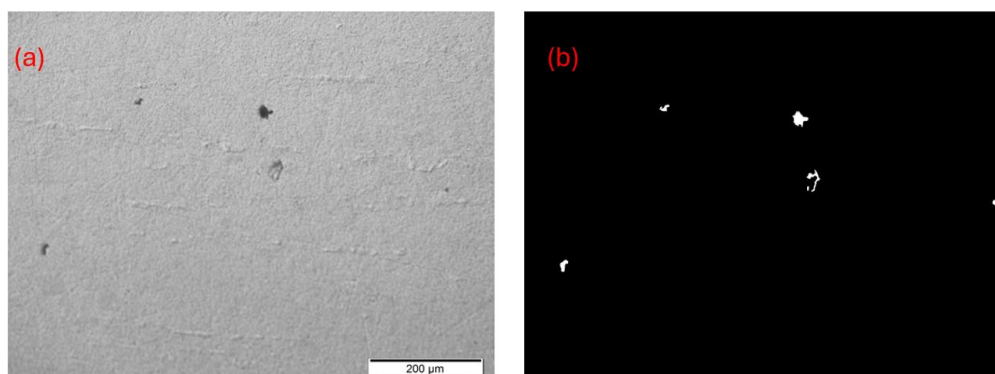
### 3.3 MICROSCOPIA ÓTICA (MO)

Após os ensaios de corrosão potenciodinâmicos cíclicos, cada amostra foi levada ao microscópio ótico Olympus modelo BX60M, pertencente ao Laboratório de Materiais do CEFET/RJ (LAMAT) (Figura 3-8). Utilizando o aumento de 200x, com o auxílio do *software* Olympus Stream Essentials, foram capturadas 5 imagens de regiões diferentes de cada amostra, totalizando 15 imagens.



**Figura 3-8 - Microscópio óptico Olympus modelo BX60M.**  
**Fonte: Autoral; 2025**

As imagens capturadas foram inseridas no *software Image J*, sendo realizada a contagem de pixels de imagens binárias, permitindo, desta forma, a quantificação da área de corrosão por pites de cada amostra. Esta análise foi realizada tomando a média das cinco imagens por condição de ensaio. O *software* realizou esse cálculo ao binarizar as imagens, identificando a diferença do padrão de cor entre áreas com pites (mais escuras) e a superfície da amostra (mais clara). A Figura 3-9 demonstra a imagem original (à esquerda) e com o contraste aplicado (à direita).



**Figura 3-9 - (a) Imagem obtida por MO e (b) Imagem binária para contagem de pixels através do software Image J.**  
**Fonte: Autoral; 2025.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem como objetivo trazer e discutir os dados obtidos ao longo da parte experimental do trabalho. Dessa forma, através dos resultados alcançados nos ensaios de corrosão e análise por microscopia ótica, foi possível avaliar a resistência a corrosão do aço AISI 317L em meio ácido, sob a presença de inibidor de corrosão.

### 4.1 ENSAIO DE POLARIZAÇÃO

Sob a ótica do ensaio de polarização, os valores obtidos a partir dos ensaios se mostram essenciais para cálculo de dois parâmetros fundamentais, são eles:

- **CR** – Taxa de corrosão (mm/ano)
- **Ee** – Eficiência de inibição de corrosão

Assim, como recomenda a norma ASTM G 102 (ASTM, 2023), inicialmente calculou-se o peso equivalente de elementos constituintes com mais de 1% em massa (Fe, Mn, Cr, Ni e Mo) (**EW**), como indica a Tabela 4-1 baseada na composição da chapa de metal base. Dessa forma, adicionalmente as informações da fração de massa dos elementos da liga metálica provenientes do trabalho de Farneze (2016), buscou-se as massas atômicas dos elementos com base na tabela periódica da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC, 2022), possibilitando o cálculo abaixo:

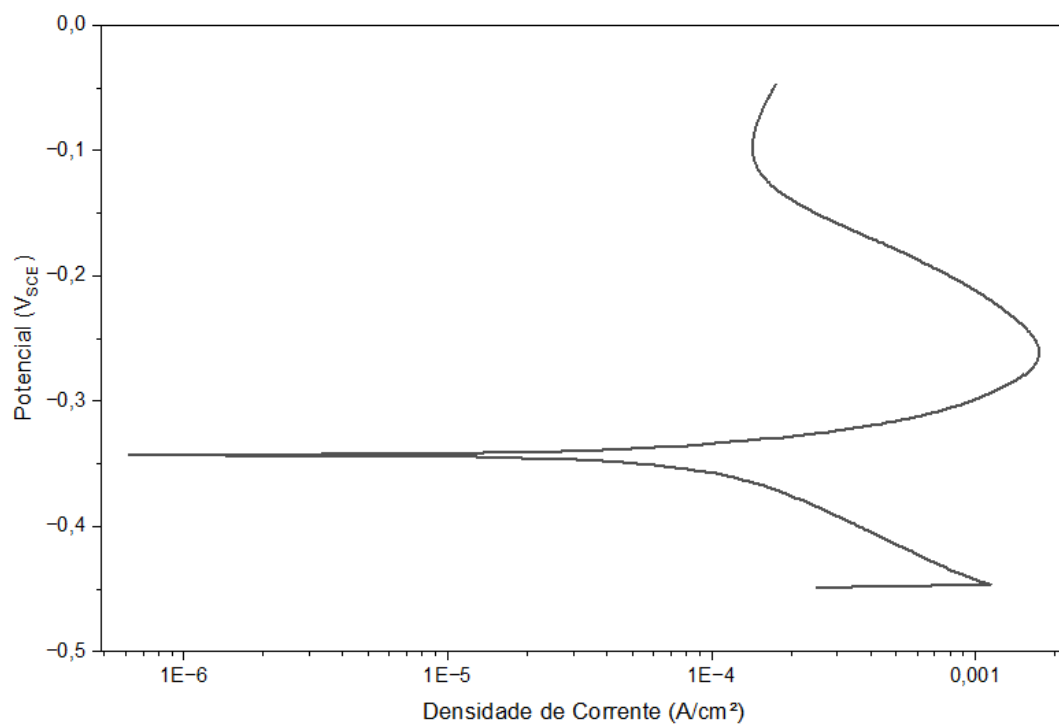
**Tabela 4-1 - Peso Equivalente Material Base**

| Peso equivalente AISI 317L |                                       |         |        |                              |
|----------------------------|---------------------------------------|---------|--------|------------------------------|
| Elemento                   | $n_i$                                 | $f_i$   | $W_i$  | $\frac{n_i \times f_i}{W_i}$ |
| Ferro (Fe)                 | 2                                     | 0,65572 | 55,845 | 0,023484                     |
| Manganês (Mn)              | 2                                     | 0,0134  | 54,938 | 0,000488                     |
| Cromo (Cr)                 | 3                                     | 0,1813  | 51,996 | 0,01046                      |
| Níquel (Ni)                | 2                                     | 0,1141  | 58,693 | 0,003888                     |
| Molibdênio (Mo)            | 3                                     | 0,0302  | 95,95  | 0,000944                     |
| Total                      | <b><math>E_w = 25,46856908</math></b> |         |        |                              |

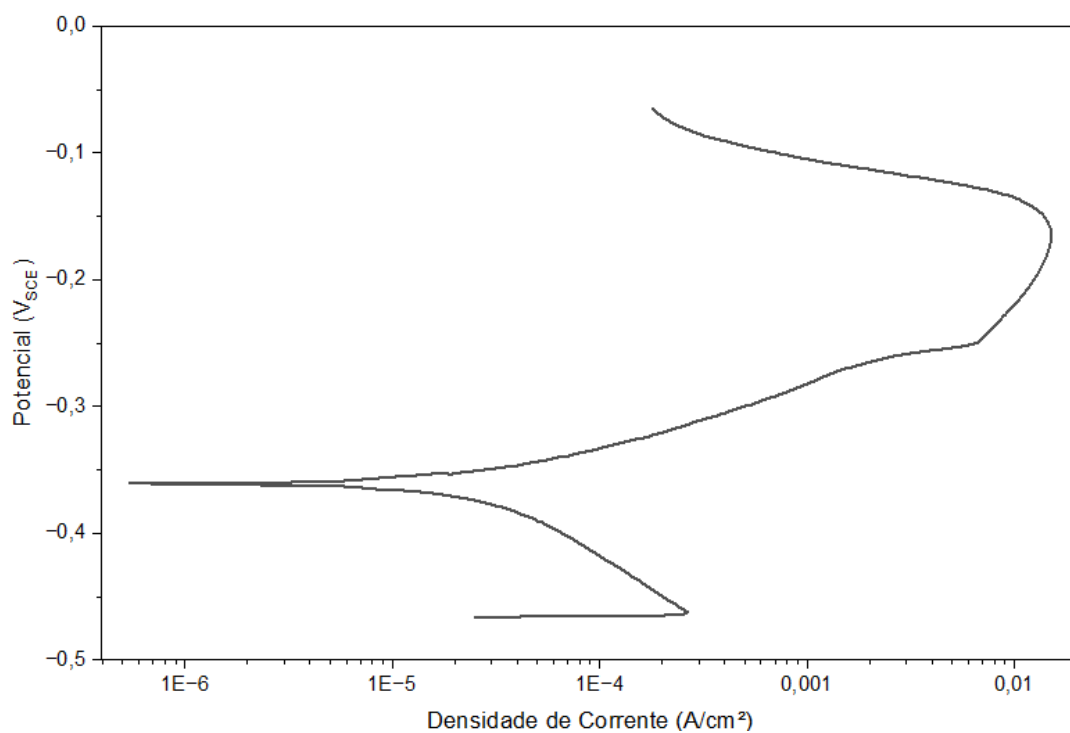
Fonte: Autoral; 2025.

$n_i$  – Valência dos elementos de liga;  $f_i$  – Fração de massa dos elementos de liga;  $W_i$  – Massas atômicas dos elementos de liga

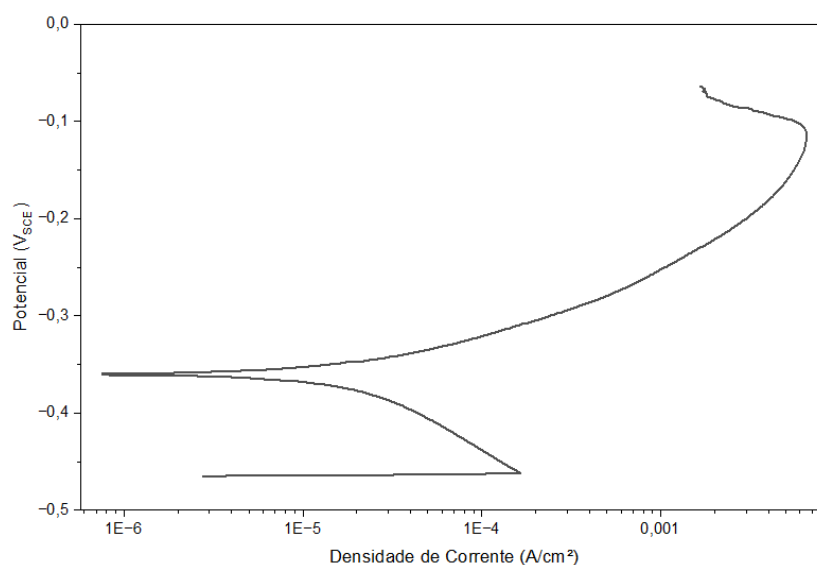
Com a finalidade de calcular as taxas de corrosão, é importante analisar as curvas de polarização por meio da extrapolação das retas de Tafel para cada amostra, originadas através do software específico, baseando-se nas exportações de dados por cada ensaio realizado. As Figuras 4-1, 4-2 e 4-3 exibem as curvas obtidas em cada condição avaliada no aço AISI 317L, referentes as distintas concentrações de tiouréia.



**Figura 4-1 - Curva TAFEL, amostra sem inibidor.**  
**Fonte: Autoral; 2025**



**Figura 4-2 - Curva TAFEL, amostra 250mg/L de inibidor.**  
**Fonte: Autoral; 2025**



**Figura 4-3 - Curva TAFEL, amostra 500mg/L de inibidor.**  
**Fonte: Autoral; 2025**

Em posse das informações de peso equivalente ( $EW$ ) e dos dados obtidos nas curvas de polarização, foram calculadas e classificadas as taxas de corrosão (mm/ano) em acordo com a norma NACE SP0775 (2013), conforme apresentado na Tabela 4-2. Foi considerado a densidade do material ( $\text{g/cm}^3$ ) igual a 8 e a constante  $K$ , anteriormente citada equivalente a 0,00327.

**Tabela 4-2 - Variáveis obtidas a partir das curvas de polarização.**

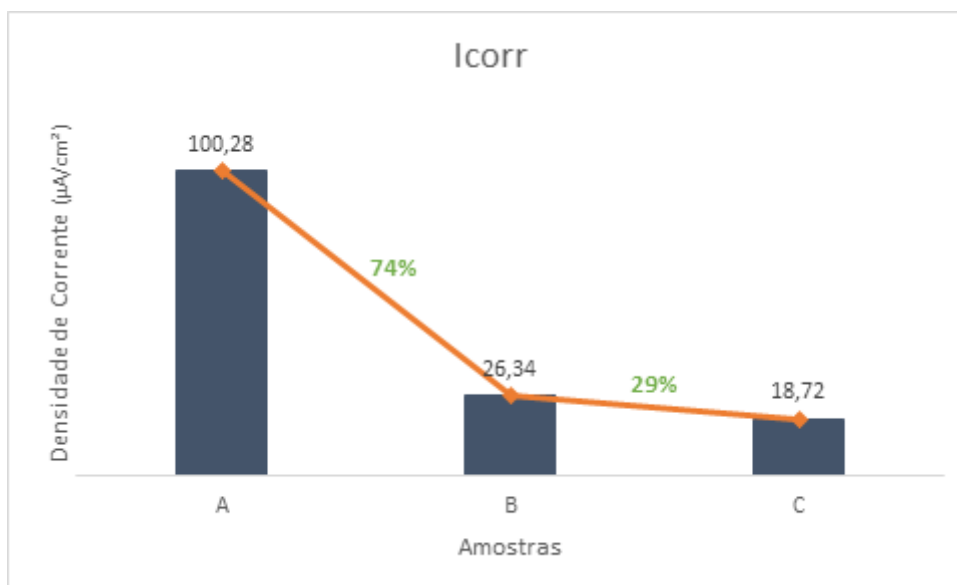
| Ensaio Eletroquímico |                          |          |                           |                                                    |                       |            |                                 |                                         |
|----------------------|--------------------------|----------|---------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------|------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| Amostra              | $E_{\text{corr}}$<br>(V) | $I$ (A)  | Área<br>( $\text{cm}^2$ ) | $I_{\text{corr}}$<br>( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | $R_p$<br>( $\Omega$ ) | PCA<br>(V) | Taxa de<br>corrosão<br>(mm/ano) | Classificação<br>de taxa de<br>corrosão |
| A                    | -0,348                   | 4,01E-05 | 0,4                       | 100,28                                             | 341,65                | -0,348     | 1,043943                        | Severa                                  |
| B                    | -0,362                   | 1,05E-05 | 0,4                       | 26,34                                              | 1338,80               | -0,365     | 0,274207                        | Severa                                  |
| C                    | -0,365                   | 6,74E-06 | 0,36                      | 18,72167                                           | 2423,40               | -0,369     | 0,194898                        | Alta                                    |

**Fonte: Autoral; 2025.**

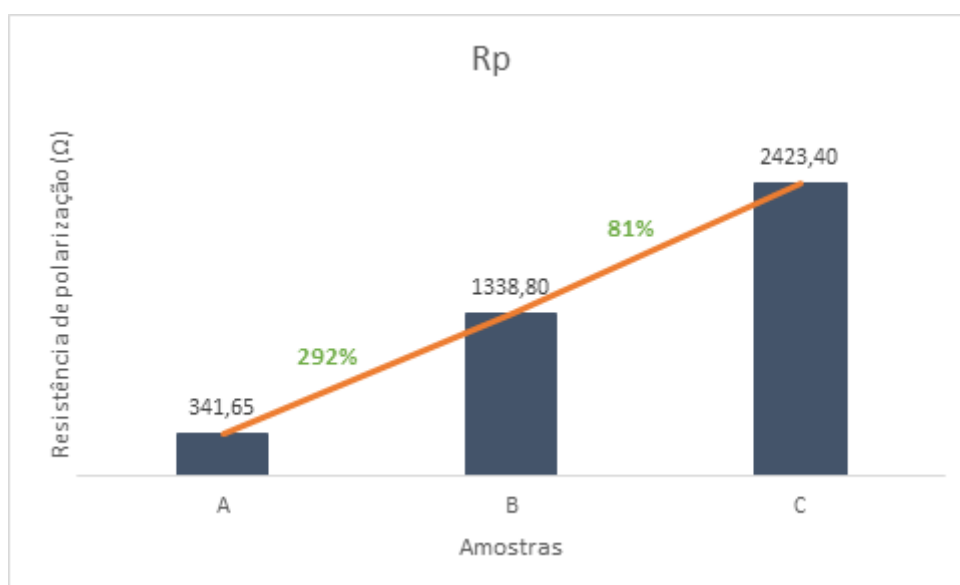
$E_{\text{corr}}$  – potencial de corrosão;  $I_{\text{corr}}$  – densidade de corrente de corrosão;  $R_p$  – resistência à polarização; PCA – potencial de circuito aberto.

É possível analisar a severidade do meio imposta durante o ensaio das três amostras, observando o efeito do inibidor na diminuição gradual da taxa de corrosão das amostras ao longo dos ensaios realizados, refletindo na classificação inferior dentro do cenário do último ensaio realizado (C). Esse desempenho é comparável aos valores reportados por Mainier (2020) para soluções ácidas contendo tiouréia, reforçando sua aplicabilidade industrial.

Com isso, pode-se concluir que o inibidor de corrosão tem como consequência a diminuição do parâmetro de densidade de corrente do sistema ( $i_{corr}$ ), além do aumento da resistência à polarização ( $R_p$ ). Isso ocorre devido a proteção que o inibidor oferece para a superfície metálica exposta à corrosão. Comparando as diferenças de valores para cada amostra, essa análise torna-se clara à medida que há aumentos na concentração de Tiouréia. Observa-se que não ocorreu uma variação significativa do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ). As Figuras 4-4 e 4-5 mostram gráficos comparativos do comportamento da densidade de corrente ( $i_{corr}$ ) e resistência à polarização ( $R_p$ ), respectivamente.



**Figura 4-4 - Gráfico comparativo da Densidade de corrente X Concentração de Tiouréia.**  
**Fonte: Autoral; 2025.**



**Figura 4-5 - Gráfico comparativo da Resistência à Polarização X Concentração de Tiouréia.**  
**Fonte: Autoral; 2025.**

Por fim, a Tabela 4-3 abaixo, construída com base na NACE SP0775 (2013), apresentam os valores utilizados no cálculo da eficiência ( $E_e$ ) para as diferentes concentrações do inibidor de corrosão. A eficiência da tiouréia foi calculada pela fórmula relatada por Radojčić et al. (2008),  $E_e = \left( \frac{I_{corr_s} - I_{corr_c}}{I_{corr_s}} \right) \times 100$ , onde  $I_{corr_s}$  é a densidade de corrente sem a presença do inibidor e  $I_{corr_c}$  é a densidade de corrente com a presença do inibidor.

**Tabela 4-3 - Eficiência do Inibidor de Corrosão.**

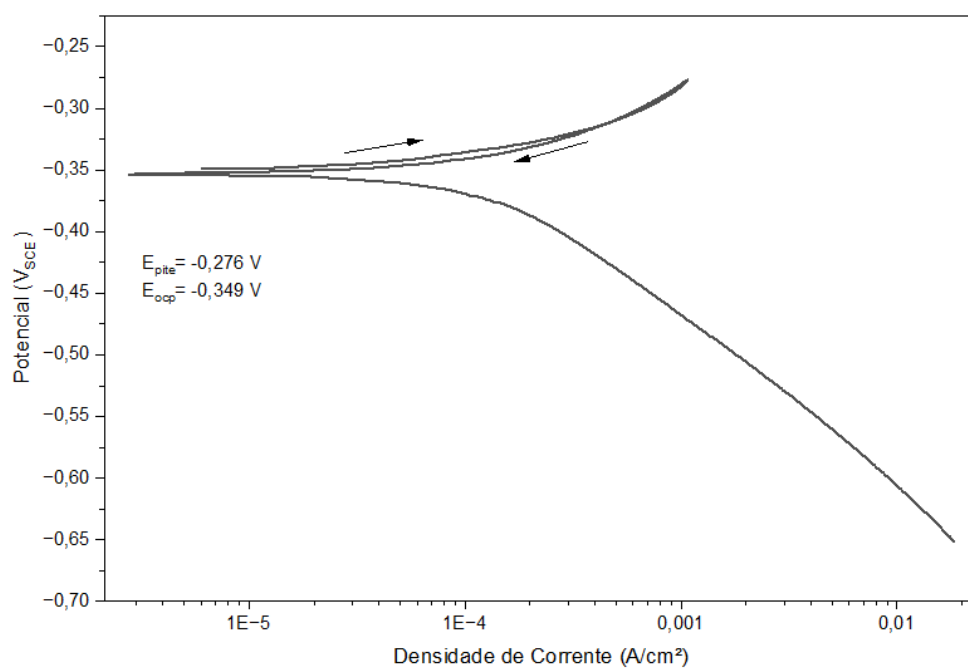
| Eficiência do Inibidor de Corrosão |                                         |                    |
|------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|
| Amostra                            | I <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> ) | E <sub>e</sub> (%) |
| A                                  | 100,28                                  | -                  |
| B                                  | 26,34                                   | 73,73%             |
| C                                  | 18,72166667                             | 81,33%             |

**Fonte: Autoral; 2025.**

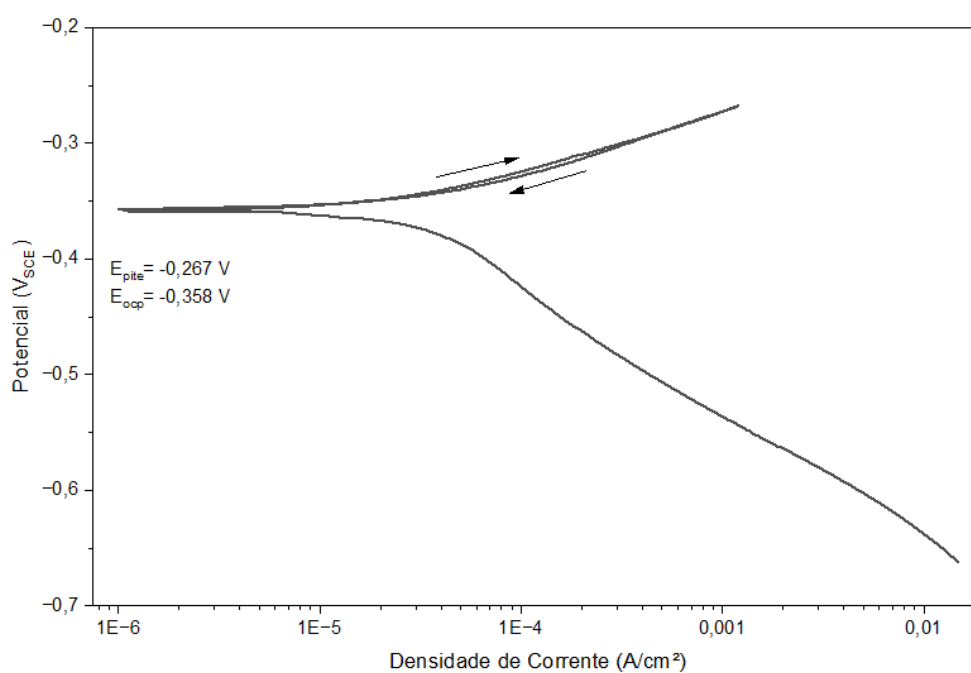
Nota-se, como esperado, que a maior concentração de Tiouréia levou a resultados menos severos ao se analisar o ambiente de atuação e, consequentemente, apresentando uma maior eficiência calculada. Já a taxa de corrosão por ano mostrou-se inversamente proporcional ao aumento da concentração do inibidor de corrosão, corroborando com sua eficácia.

#### 4.2 ENSAIO POTENCIODINÂMICO CÍCLICO

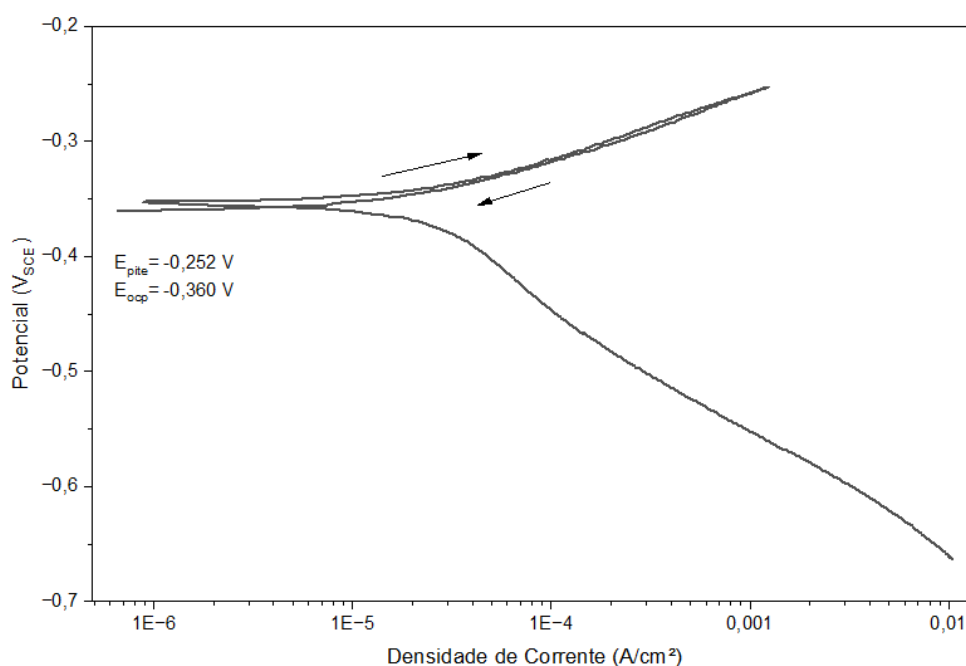
As curvas de polarização potenciodinâmica cíclica foram levantadas segundo a norma ASTM G-61 (2009), empregando a metodologia descrita no item 2.6. As Figuras 4-6, 4-7 e 4-8 exibem as curvas obtidas em cada condição avaliada no aço AISI 317L. Os parâmetros obtidos nas curvas de polarização são mostrados na Tabela 4-4, ou seja, potencial de circuito aberto ( $E_{PCA}$ ), potencial de pites ( $E_{pite}$ ) e o intervalo de passivação ( $E_{pite} - E_{PCA}$ ). Observa-se que o intervalo de passivação aumenta progressivamente de 0,073 V na amostra A para 0,108 V na amostra C. Esse comportamento confirma a tendência descrita por Mainier (2020), segundo na qual a presença crescente do inibidor contribui para ampliar a faixa de estabilidade passiva do material, dificultando a ruptura da película protetora e, consequentemente, retardando o início da corrosão por pites. Assim, a maior concentração de inibidor na amostra C promove uma proteção mais eficaz, evidenciada pelo maior intervalo de passivação. Observa-se que não ocorreu uma variação significativa do potencial de pite ( $E_{pite}$ ).



**Figura 4-6 - Curva de corrosão por pites, sem inibidor.**  
**Fonte: Autoral; 2025.**



**Figura 4-7 - Curva de corrosão por pites, 250mg/L.**  
**Fonte: Autoral; 2025.**



**Figura 4-8 - Curva de corrosão por pites, 500mg/L.**  
**Fonte: Autoral; 2025.**

**Tabela 4-4 - Intervalo de Passivação de cada amostra.**

| <b>Amostra</b> | <b><math>E_{PCA}</math> (V)</b> | <b><math>E_{pite}</math> (V)</b> | <b>Intervalo de passivação (V)</b> |
|----------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| A              | -0,349                          | -0,276                           | 0,073                              |
| B              | -0,358                          | -0,267                           | 0,091                              |
| C              | -0,360                          | -0,252                           | 0,108                              |

**Fonte: Autoral; 2025.**

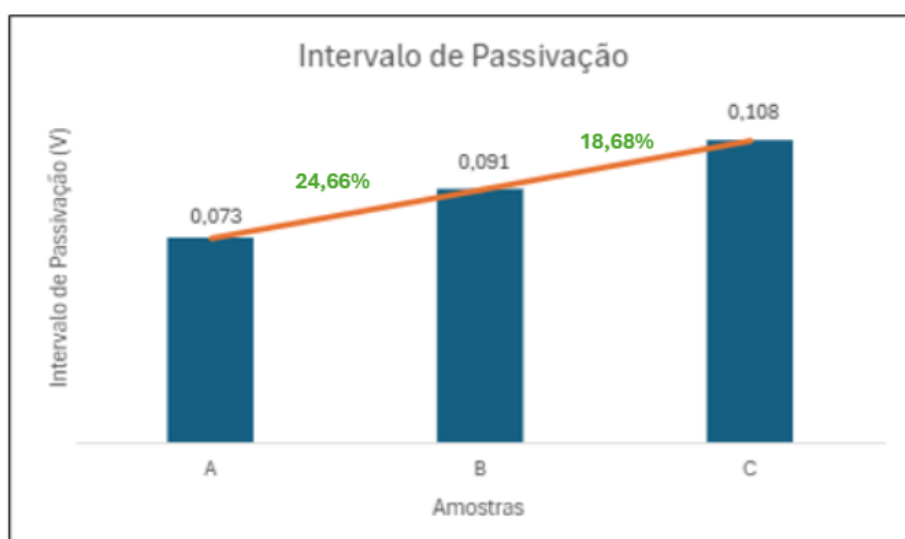
Conforme descrito no item 3.3, após os ensaios de polarização potenciodinâmica cíclica foram analisadas, por microscopia ótica, imagens de cada amostra e, com auxílio do *software Image J*, foi possível quantificar a área de corrosão por pite de cada condição analisada. A Tabela 4-5 apresenta os valores obtidos a partir da quantificação realizada em cinco imagens de áreas aleatórias.

**Tabela 4-5 - Área percentual de pite por cada foto de amostra.**

| <b>Área de pite (%)</b> |                  |                  |                  |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|
|                         | <b>Amostra A</b> | <b>Amostra B</b> | <b>Amostra C</b> |
| Foto 1                  | 0,126%           | 0,239%           | 0,022%           |
| Foto 2                  | 0,177%           | 0,059%           | 0,077%           |
| Foto 3                  | 0,190%           | 0,085%           | 0,098%           |
| Foto 4                  | 0,165%           | 0,109%           | 0,050%           |
| Foto 5                  | 0,410%           | 0,064%           | 0,118%           |
| <b>Média</b>            | <b>0,214%</b>    | <b>0,111%</b>    | <b>0,073%</b>    |

Fonte: Autoral; 2025

Com base nos dados da Tabela 4-5 observa-se uma redução progressiva na área média de pites da amostra A (0,214%) para a C (0,073%), como evidencia o gráfico da Figura 4-9. Esse comportamento está alinhado com Mudali e Pujar (2002), que destacam a importância da formação de filmes protetores para retardar a nucleação de pites. Essa diminuição na área corroída está de acordo com a expansão do intervalo de passivação observado eletroquimicamente, reforçando que a presença do inibidor não apenas estabiliza a camada passiva, mas também limita efetivamente a propagação dos pites.



**Figura 4-9 - Gráfico comparativo do Intervalo de Passivação X Concentração de Tiouréia.**  
 Fonte: Autoral; 2025.

Dessa maneira, cruzando os dados apresentados na Tabela 4-5 com os dados de área de cada amostra em exposição durante o ensaio potenciodinâmico

cíclico, informados pela Tabela 3-4 que foi apresentada no item 3.2.4, foi possível obter a estimativa de área total atingida pela corrosão por pites, conforme mostrado na Tabela 4-6.

**Tabela 4-6 - Área média de pite por amostra.**

| Área média de pite por amostra |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Amostra                        | Área de pite (cm <sup>2</sup> ) |
| A                              | 0,0009612                       |
| B                              | 0,00035584                      |
| C                              | 0,0003066                       |

Fonte: Autoral; 2025

Portanto, fica evidente a ação do inibidor na comparação entre amostras. Comparando as áreas de pites nas amostras A (sem inibidor) e B (250 mg/L), é possível verificar que a tiouréia diminuiu a atividade corrosiva em cerca de **63%**. Aumentando a concentração de tiouréia (de 250 mg/L para 500 mg/L) foi possível notar uma diminuição de área considerável, chegando a um valor **14%** menor.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve como objetivo avaliar a resistência à corrosão do aço AISI 317L em meio ácido, com e sem o uso da tiouréia como inibidor de corrosão, permite as seguintes conclusões:

- O aumento da concentração de tiouréia promoveu redução na densidade de corrente e elevação da resistência à polarização, indicando formação de barreira protetora sobre a superfície metálica.
- Embora todas as amostras tenham apresentado taxas corrosão desfavoráveis, houve redução expressiva com o uso do inibidor: de 1,04 mm/ano para 0,19 mm/ano, atingindo eficiência máxima de 81,33%.
- Os ensaios potenciodinâmicos cíclicos mostraram que o intervalo de passivação aumenta progressivamente de 0,073 V na amostra A (sem inibidor) para 0,108 V na amostra C (500 mg/L). Desta forma, a presença crescente do inibidor contribui para ampliar a faixa de passivação do material em meio ácido (5% HCl).
- A presença da tiouréia reduziu significativamente a área afetada por pites. A amostra sem inibidor apresentou média de 0,214%, enquanto as amostras com 250 mg/L e 500 mg/L apresentaram 0,111% e 0,073%, respectivamente.

Em síntese, os resultados obtidos confirmam que a tiouréia é um inibidor eficaz para reduzir a agressividade de meios ácidos sobre o AISI 317L, embora não elimine totalmente o risco de corrosão severa. A comparação com estudos prévios reforça a validade dos achados e indica que estratégias complementares, como controle de temperatura e uso combinado de inibidores, podem potencializar a proteção.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, são recomendados os seguintes temas, como oportunidades para aprofundar e expandir conhecimentos no contexto deste estudo:

- Analisar a eficiência da tiouréia quanto à inibição de corrosão do aço AISI 317L em soluções com concentrações de HCl próximas ao limite máximo aplicado no processo de acidificação de poços de petróleo.
- Avaliar a eficácia da tiouréia, quanto à inibição de corrosão do aço AISI 317L utilizando a mesma concentração de HCl aplicada neste trabalho, porém, na temperatura limite de aplicação da tiouréia (60°C).
- Estudar o efeito do acabamento da usinagem na eficiência da tiouréia quanto a inibição de corrosão do aço AISI 317L, em soluções com diferentes concentrações de HCl.
- Avaliar a eficiência da tiouréia quanto à inibição de corrosão do aço AISI 317L em soluções com diferentes concentrações de HCl, através de ensaios gravimétricos e pelo levantamento da temperatura crítica na formação de pites.

## 7 REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL STAINLESS EUROPE. *Stainless Steel and Corrosion*, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM G3 - 89 – *Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion*. West Conshohocken: ASTM International, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM G5 - 14 – *Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*. West Conshohocken: ASTM International, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM G31. *Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*. 2021.

ASTM INTERNATIONAL. G 61: *Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys*, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM G102-89. *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates from Electrochemical Measurements*, 2023.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM G102-23. *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates from Electrochemical Measurements*, 2023.

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook: Corrosion. v.13. Ohio: ASM International, 1987.

ASTM A380-06. *Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless-Steel Parts, Equipment, and Systems*. 2006.

BARBOSA, A. R. *Análise do comportamento tribológico do aço inoxidável super duplex UNS S32760 submetido ao ensaio de deslizamento recíproco em solução salina com e sem a presença de inibidor de corrosão*. 2023. 124 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2023.

BIJAPUR, K.; MOLAHALLI, V.; SHETTY, A.; TOGHAN, A.; DE PADOVA, P; HEGDE, G. *Recent Trends and Progress in Corrosion Inhibitors and Eletrochemical Evaluation*. Applied Sciences, v. 13, p. 10107, 2023.

BRAGA, Carolina Gomes. *Uso de tioureias como potenciais inibidores de corrosão do aço-carbono 1020 em meio ácido*. 2012. Projeto Final de Curso (Graduação em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

BRANDT, I.; ARAÚJO, C. I. L.; DELATORRE, R. G.; PASA, A. A. *Electrical Characterization of Cu/Cu<sub>2</sub>O Electrodeposited Contacts*. ECS Transactions (Online), v. 14, p. 413-419, 2008.

BYBEE, Karen. *Matrix Acid Stimulation*. Journal of Petroleum Technology. v.55, n.07, p.49- 50, jul.2000

CARBÓ, A. *Electrochemical Methods in Corrosion Research*. Madrid: CSIC Press, 2008.

CHANG, L. et al. Corrosion resistance of super duplex stainless steels in acidic environments. *Materials Performance*, v. 60, n. 4, p. 45-52, 2021.

COLAR.COM. *Exemplo de Rabo de Andorinha*. Disponível em: < <https://www.colar.com/>>. Acesso em: 30 set. 2025.

CUI, Z. et al. *Corrosion behavior of stainless steels in acidic environments: Mechanisms and mitigation strategies*. Corrosion Science, v. 90, p. 112, 2015.

DANESHY, Ali. *Hydraulic Fracture to Improve Production*. The Way Ahead. Texas, vol 6, n.3, p. 14-17, 2010

DAVIS, J. R. *Corrosion of Weldments*. Ohio: ASM International, 2006.

ECONOMIDES, Michael J.; Nolte, Kenneth G. *Reservoir Stimulation*. 3<sup>a</sup> ed. Wiley, 2000.

FARRAR, J. C. M. *The Alloy Tree: A Guide to low-alloy steels, stainless steels and nickel-base alloys*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2004.

FARNEZE, H. N. Efeitos do Envelhecimento Térmico nas Propriedades Mecânicas e na Resistência à Corrosão de Metais de Solda de Aço AISI 317L pelos Processos GTAW e FSW. Tese de Doutorado – Universidade Federal Fluminense, 2016.

GENTIL, V. *Corrosão*. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

HO, M. Y.; GEDDES, J.; BARMATOV, E.; CRAWFORD, L.; HUGHES, T. Effect of composition and microstructure of duplex stainless steel on adsorption behavior and efficiency of corrosion inhibitors in 4 molar hydrochloric acid. Part I: Standard DSS 2205. *Corrosion science*, v.137, p. 43-52, 2018.

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCES IN ENGINEERING & TECHNOLOGY.  
*Polarization curves of carbon steel in HCl with thiourea and chlorine*. June, 2020.

IUPAC. *Periodic Table of Elements*. Disponível em: <<https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>>. Acesso em: 20 set. 2025.

IVASHCHYSHYN, F. et al. Effect of optical illumination and magnetic field on the electroconductive and polarization properties of clathrate GaSe> synthesized under lighting. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, v. 70, n. 5, 2022.

KHATAK, H. S.; BALDEV RAJ. *Corrosion of stainless steels*. ASM International, 2006.

KERROUM, Y.; GUENBOUR, A.; BELLAOUCHOU, A.; IDRISSE, H.; GARCIAANTON, J.; ZARROUK, A. Chemical and Physical Effects of Fluoride on the Corrosion of Austenitic Stainless Steel in Polluted Phosphoric Acid. *Journal of Bio and Tribo-Corrosion* (2019), *Materials today communications*, v. 28, n. 68, p. 1 - 14, 2019.

LO, K. H.; SHEK, C. H.; LAI, J. K. L. Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, v. 65, n. 4-6, p. 39-104, 2009.

LOTO, R. T.; LOTO, C. A.; POPOOLA, A. P. I. Corrosion inhibition of thiourea and thiadiazole derivatives: A Review. *Journal of Materials and Environmental Science*, v.3 (5), p. 885-894, 2012.

MAINIER, F. B. et al. Tiouréia como inibidor de corrosão para aços inoxidáveis em meios ácidos. *Journal of Materials Engineering*, v. 15, n. 2, p. 45-60, 2020.

MAINIER, F. B. et al. Acid stimulation in oil wells: Challenges and solutions. *Journal of Petroleum Engineering*, v. 15, n. 2, p. 112-125, 2018.

MEGALIGAS, P. *Aços especiais na indústria de energia*. São Paulo: Edgard Blücher, 2017.

MUECKE, Thomas W. Principles of Acid Stimulation. In: International Exhibition and Technical Symposium, Pequim, Society of Petroleum Engineers, 1982

MUDALI, K.U.; PUJAR, M.G. *Corrosion of Austenitic Stainless Steels: Mechanism, Mitigation and Monitoring*. UK: Woodhead Publishing Limited, 2002.

NACE INTERNATIONAL. *Economic Impact Corrosion – NACE IMPACT Report*. Disponível em: <<http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>>. Acesso em: 13 set. 2025, ano: 2016.

NACE INTERNATIONAL. NACE SP0775: *Preparation, Installation, Analysis and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations*. Houston, TX, 2013.

NAGYSZALANCZY, S. *The wood sanding book: A guide to abrasives, machines, and methods*. New York: Tauton Press, 1997.

OLIVEIRA, C. G. M. de *et al.* Synthesis of thiourea derivatives and its evaluation as corrosion inhibitor for carbon steel. *Phosphorus, Sulfur and Silicon and the Related Elements*, v. 190, n. 8, p. 1366-1377, 3 ago. 2015.

PALÁCIO, F. O. Efeito do Tratamento Térmico no Grau de Sensitização do Aço Inoxidável Austenítico AISI 304, avaliado por método de reativação eletroquímica potenciodinâmica na versão ciclo duplo (DL-EPR). Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) – UFES, Vitória, 2008.

QUEIROZ, A. C.; SILVA, S. J. P. Desafios na produção de petróleo em águas profundas: Incrustação e corrosão. *Revista de Engenharia de Petróleo*, v. 12, n. 1, p. 78-92, 2023.

RADOJČIĆ, I.; BERKOVIĆ, K.; KOVAČ, S.; VORKAPIĆ-FURAČ, J. Natural honey and black radish juice as tin corrosion inhibitors. *Corrosion Science*, v. 50, p. 1498 – 1504, 2008.

RENNER, P.; CHEN, Y.; HUANG, Z.; RAUT, A.; LIANG, H. Tribocorrosion Influenced Pitting of a Duplex Stainless Steel. *Lubricants*, v. 9, p. 1 – 11, 2021.

SANCHES, L. P. Estudo comparativo quanto à resistência à corrosão entre aços inoxidáveis utilizados em trocadores de calor. Projeto Final – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

SHEN, C. B.; WANG, S. G.; YANG, H. Y.; LONG, K.; WANG, F. H. Corrosion and corrosion inhibition by thiourea of bulk nanocrystallized industrial pure iron in dilute HCl solution. *Corrosion Science*, v. 48, p. 1655-1665, 2006.

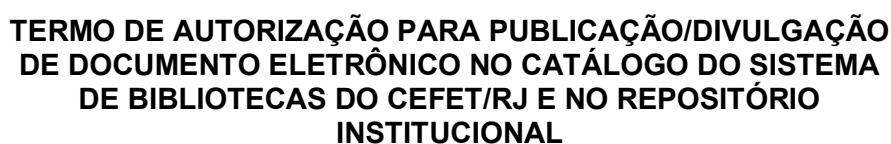
SEDRIKS, A. J. *Corrosion of Stainless Steels*. New York: Wiley, 1996.

SILVA, J. P. Estudo de adsorção de ácidos naftênicos a partir de correntes de hidrocarbeto. Porto Alegre: UFRGS, 2015.

YASEEN, S.; MANSOORI, G. A. Asphaltenes behavior during petroleum reservoirs acidizing (a molecular-scale onset study). *SOCAR Proceedings*, v. 3, p. 038-046, 2020.

WOLYNEC, S. *Técnicas eletroquímicas em corrosão*. São Paulo: Edusp, 2003.

ZHANG, Y. et al. Advanced materials for harsh environments in oil and gas industry. *Materials Today*, v. 50, p. 120-135, 2022.



**1- Tipo de trabalho:** ☒ Projeto Final (Graduação)    ☐ Especialização  
                                    ☐ Dissertação         ☐ Tese

Co-orientador: -

Justifique:

☐ Outras partes do trabalho: \_\_\_\_\_

JOAO VITOR GROMIK RIBEIRO  
Data: 09/01/2026 16:55:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**HUMBERTO NOGUEIRA FARNEZE**  
Data: 10/01/2026 11:31:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do co-orientador