



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

WESLEY SILVA BARBOSA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA
ENSAIOS CORROSIVOS**

**TUCURUÍ – PA
2026**

WESLEY SILVA BARBOSA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA
ENSAIOS CORROSIVOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva

TUCURUÍ – PA
2026

WESLEY SILVA BARBOSA

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ENSAIOS CORROSIVOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva

Data de aprovação: **17/07/2026**

Conceito: **Excelente**

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva
FEM/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Douglas Neves Garcia
FEM/CAMTUC/UFPA

Prof. Me. Danilo Silva Santos
NDAE/CAMTUC/UFPA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586d Silva Barbosa, Wesley.
Desenvolvimento de uma bancada didática para ensaios corrosivos /
Wesley Silva Barbosa. — 2026.
45 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus
Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tucuruí,
2026.

1. Corrosão, Célula de Corrosão, Arduino, Ensaios Corrosivos.. I.
Título.

CDD 620.11223

*Aos meus pais Antônio Oliveira e Dulcirene dos
Santos.
A minha falecida avó Marcelina Ribeiro.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me deu incondicionalmente a vida, forças nos momentos difíceis, coragem e saúde para conquistar meus objetivos.

Aos meus pais, Dulcirene dos Santos Silva Barbosa e Antônio Oliveira Barbosa, expresso minha mais profunda gratidão. Vocês foram meu alicerce durante toda essa caminhada, oferecendo amor, incentivo e apoio incondicional. Com muito esforço, dedicação e inúmeros sacrifícios, fizeram tudo o que estava ao alcance — e até o que parecia impossível — para que eu pudesse realizar meus sonhos e alcançar meus objetivos. Esta conquista também é de vocês.

Aos meus irmãos, Jaqueline e Wellington, bem como aos demais familiares, agradeço pelo carinho, pela confiança e pelas palavras de incentivo que me fortaleceram ao longo dessa jornada. Saber que eu podia contar com vocês tornou os desafios mais leves e as vitórias ainda mais significativas.

Aos amigos que a Faculdade de Engenharia me presenteou, Gilson Ricardo, Mateus Moreira, Tyson Baia e Wendel Xavier, deixo meu sincero agradecimento pela amizade, companheirismo e apoio ao longo desses anos. Compartilhamos não apenas conhecimentos acadêmicos, mas também experiências, desafios, conquistas e momentos que ficarão para sempre na memória. A contribuição de cada um foi fundamental para meu crescimento pessoal e profissional.

A todos os professores da Universidade Federal do Pará, especialmente aos docentes da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), minha gratidão pelos ensinamentos transmitidos, pela dedicação e pelo compromisso com a formação de seus alunos. Os conhecimentos adquiridos ao longo do curso foram essenciais para minha formação acadêmica e para a construção da pessoa e do profissional que me tornei.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva, expresso meu especial agradecimento pela paciência, disponibilidade e comprometimento durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação, seus conselhos e sua confiança foram fundamentais em cada etapa desta pesquisa. Agradeço por compartilhar seu conhecimento e por me auxiliar prontamente sempre que surgiram dúvidas e dificuldades.

Agradeço à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento desta pesquisa. Esse suporte foi fundamental para a realização das atividades e contribuiu significativamente para a execução e o desenvolvimento deste trabalho.

"A persistência é o caminho do êxito."

(Charles Chaplin)

RESUMO

A corrosão é um fenômeno natural responsável pela deterioração de materiais metálicos em decorrência de interações químicas e eletroquímicas com o meio ambiente, gerando impactos significativos nos setores industrial e tecnológico. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma bancada de ensaios corrosivos destinada à análise do comportamento de ligas ferro-carbono, com ênfase no aço ABNT 1020. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica abordando os principais fundamentos da corrosão, incluindo seus mecanismos eletroquímicos, tipos de corrosão e fatores que influenciam sua ocorrência. Posteriormente, foi desenvolvida a metodologia experimental, contemplando a confecção dos corpos de prova por usinagem, preparação metalográfica para análise microestrutural e montagem do sistema eletroquímico. A bancada foi projetada por meio de modelagem CAD 3D, permitindo a visualização e organização dos componentes antes da sua construção física. O sistema experimental é composto por uma célula eletroquímica contendo eletrodo de trabalho, eletrodo de referência e contraeletrodo, além de sensores de corrente e tensão integrados a um microcontrolador Arduino Uno, responsável pela aquisição e processamento dos dados em tempo real. Os ensaios foram realizados utilizando uma solução eletrolítica de cloreto de sódio (NaCl) a 5%, simulando condições favoráveis ao processo corrosivo. Durante os experimentos, foram coletados dados de corrente e tensão, possibilitando o monitoramento do comportamento eletroquímico do material ao longo do tempo. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da bancada desenvolvida como ferramenta para estudos de corrosão, apresentando potencial de aplicação tanto em ambientes acadêmicos quanto industriais, contribuindo para a compreensão dos mecanismos corrosivos e para o desenvolvimento de estratégias de controle e prevenção da corrosão.

Palavras-chave: corrosão, célula de corrosão, Arduino, ensaios corrosivos.

ABSTRACT

Corrosion is a natural phenomenon responsible for the deterioration of metallic materials as a result of chemical and electrochemical interactions with the environment, generating significant impacts on the industrial and technological sectors. In this context, the present work aims to develop a corrosive test bench for the analysis of the behavior of iron-carbon alloys, with emphasis on ABNT 1020 steel. Initially, a literature review was carried out addressing the main fundamentals of corrosion, including its electrochemical mechanisms, types of corrosion and factors that influence its occurrence. Subsequently, the experimental methodology was developed, contemplating the preparation of the specimens by machining, metallographic preparation for microstructural analysis and assembly of the electrochemical system. The workbench was designed through 3D CAD modeling, allowing the visualization and organization of the components before their physical construction. The experimental system consists of an electrochemical cell containing a working electrode, reference electrode and counter-electrode, as well as current and voltage sensors integrated with an Arduino Uno microcontroller, responsible for acquiring and processing data in real time. The tests were carried out using a 5% sodium chloride (NaCl) electrolyte solution, simulating favorable conditions for the corrosive process. During the experiments, current and voltage data were collected, making it possible to monitor the electrochemical behavior of the material over time. The results obtained demonstrate the feasibility of the bench developed as a tool for corrosion studies, presenting potential for application in both academic and industrial environments, contributing to the understanding of corrosive mechanisms and to the development of corrosion control and prevention strategies.

Keywords: corrosion, corrosion cell, Arduino, corrosive testing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Formas de Corrosão.	16
Figura 2 – Ciclo dos metais.	19
Figura 3 – Exemplos representativos das principais formas de corrosão observadas em superfícies metálicas.....	23
Figura 4 – Formação do potencial de eletrodo na interface metal/eletrólito	25
Figura 5 – Série eletroquímica de alguns metais.....	26
Figura 6 – Representação do eletrodo padrão de hidrogênio	27
Figura 7 – (a) O aço ABNT 1020; (b) dimensões finais do aço	30
Figura 8 – Aço ABNT 1020 embutido em baquelite a quente.....	31
Figura 9 – microestruturas do aço 1020, 100x	31
Figura 10 – Aço 1020 com um aumento de 200x.....	31
Figura 11 – Corpo de prova	32
Figura 12 – Representação do modelo CAD 3D da bancada de ensaios corrosivos	33
Figura 13 – Bancada de ensaio Corrosivos	34
Figura 14 – Configuração do sistema para aquisição de dados	35
Figura 15 – Representação esquemática da vista explodida da bancada.....	36
Figura 16 – Curvas de corrente elétrica em função do tempo	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição (%) química do aço carbono ABNT 1020.....	30
Tabela 2 – componentes da bancada.....	36
Tabela 3 – Apresentação do orçamento do projeto.....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	INTRODUÇÃO Á CORROSÃO	16
2.1.1	Metais Ferrosos e Não Ferrosos.....	18
2.1.2	Aspectos gerais	18
2.2	FUNDAMENTOS ELETROQUÍMICOS DA CORROSÃO.....	20
2.2.1	Formas de corrosão	22
2.3	POTENCIAL DE ELETRODO.....	23
2.3.1	Formação do potencial de eletrodo	24
2.3.2	Série eletroquímica dos metais	25
2.3.3	Potencial padrão de eletrodo	26
2.3.4	Influência do potencial de eletrodo na corrosão	27
2.3.5	Aplicação do potencial de eletrodo no estudo da corrosão	28
2.4	Potencial de circuito aberto	28
2.5	BANCADAS DE ENSAIOS CORROSIVOS.....	29
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	30
3.2	SOLUÇÃO DE TRABALHO	32
3.4	CÓDIGO DE INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA ARDUINO UNO.....	32
3.5	MODELAGEM CAD 3D DO PROJETO	33
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.2	FUNCIONAMENTO DA BANCADA	37
4.3	ORÇAMENTO DO PROJETO	39

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
	REFERÊNCIAS	41
	ANEXO	44

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um fenômeno caracterizado pela deterioração gradual dos materiais em decorrência de interações físico-químicas com o ambiente ao qual estão expostos. Esse processo ocorre, na maioria das vezes, na interface entre o material metálico e o meio corrosivo, promovendo alterações em suas propriedades e comprometendo sua integridade estrutural. Como consequência, podem ocorrer reduções na resistência mecânica, na vida útil e no desempenho dos componentes afetados (QUADROS, 2019).

A intensidade e a velocidade da corrosão em metais dependem de diferentes condições do meio ao qual o material está exposto. Elementos como água, sais, gases e compostos ácidos atuam como agentes corrosivos, contribuindo para o desenvolvimento e a propagação dos mecanismos de deterioração do material metálico (CHEN; CHEN, 2018). Segundo a análise de Daniliszyn (2013), na atualidade, o aço representa uma das ligas metálicas mais empregadas pela indústria, desempenhando papel fundamental em diferentes setores da economia. Sua utilização abrange desde a fabricação de ferramentas e máquinas até a construção de estruturas civis, evidenciando sua importância para o desenvolvimento tecnológico e industrial.

De acordo com Callister e Rethwisch (2018), a corrosão metálica representa um dos principais problemas enfrentados pela indústria moderna. Estima-se que cerca de 5% da receita de países industrializados seja destinada a medidas de prevenção da corrosão, além de atividades de manutenção, reparo e substituição de componentes degradados. Esse fenômeno reduz a vida útil dos materiais e pode ser observado em diversas aplicações, como em carrocerias, radiadores e sistemas de escapamento de veículos.

Nesse contexto, os ensaios eletroquímicos desempenham um papel importante na avaliação do comportamento corrosivo dos materiais metálicos. Por meio desses ensaios, é possível analisar parâmetros como potencial, corrente elétrica e taxa de corrosão, fornecendo informações relevantes sobre a resistência dos materiais em diferentes meios agressivos. Entretanto, equipamentos comerciais destinados à realização desses estudos frequentemente apresentam custos elevados, o que limita sua utilização em instituições de ensino e pesquisa com recursos reduzidos.

Diante dessa realidade, surge a necessidade de desenvolver alternativas de baixo custo que possibilitem a realização de estudos experimentais relacionados à corrosão. A utilização de plataformas de prototipagem eletrônica, como o Arduino, associada a sensores de tensão e corrente, apresenta-se como uma solução viável para a aquisição e monitoramento de dados

eletroquímicos em tempo real, permitindo a construção de sistemas experimentais acessíveis e eficientes.

Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma bancada de ensaios corrosivos destinada à realização de estudos analíticos e comparativos sobre a resistência à corrosão em ligas ferro-carbono. Para isso, foi projetado e construído um sistema experimental composto por célula eletroquímica, sensores de monitoramento, microcontrolador Arduino e sistema de aquisição de dados. A bancada foi validada por meio de ensaios realizados com corpos de prova de aço ABNT 1020 imersos em solução salina, permitindo a obtenção de curvas de corrente em função do tempo e a análise do comportamento corrosivo do material.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste projeto de pesquisa é desenvolver uma bancada de ensaios corrosivos com a finalidade de realizar estudos analíticos e comparativos sobre a resistência à corrosão em ligas de ferro-carbono.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projetar e construir bancada de ensaios;
- Confeccionar os corpos de prova;
- Programar um microcontrolador para otimizar a aquisição de dados;
- Realizar ensaios corrosivos em condições de fluido estático;
- Coletar os valores de corrente em intervalos de tempo pré-definidos utilizando um microcontrolador Arduino.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO À CORROSÃO

A corrosão é um fenômeno natural responsável pela deterioração de materiais em decorrência da interação com o meio ambiente. Esse processo ocorre principalmente em metais e ligas metálicas e está associado a reações químicas, eletrolítica e eletroquímicas que levam à transformação do material em compostos mais estáveis, como óxidos, hidróxidos ou sais metálicos conforme a Figura 1 (GENTIL, 2011). De maneira geral, a obtenção dos metais ocorre a partir de minerais presentes na natureza, por meio de processos metalúrgicos que demandam elevada quantidade de energia. De acordo com Revie (2008), quando esses materiais entram em contato com o ambiente, tendem naturalmente a retornar a uma condição de menor energia, semelhante àquela encontrada em seus minérios originais. Esse retorno ocorre através de reações de corrosão que promovem a degradação gradual do material metálico. Portanto, a corrosão pode ser definida como o fenômeno inverso ao obtido nos processos metalúrgicos (DANILISZYN, 2013).

Figura 1 – Formas de Corrosão.



Fonte: Propeq, (2022).

Do ponto de vista eletroquímico, a corrosão envolve a ocorrência simultânea de reações de oxidação e redução na superfície do material metálico. Em determinadas regiões do metal ocorre a oxidação, onde átomos metálicos perdem elétrons e passam para o meio na forma de íons, caracterizando as chamadas regiões anódicas. Em outras regiões da superfície ocorre a reação de redução, normalmente envolvendo espécies presentes no meio, como oxigênio dissolvido ou íons hidrogênio, formando as regiões catódicas. Esse conjunto de reações

estabelece uma célula eletroquímica natural na superfície do material, na qual os elétrons se deslocam através do metal enquanto os íons se movimentam pelo eletrólito presente no ambiente. Esse mecanismo é responsável pela continuidade do processo corrosivo e explica por que a presença de um meio condutor, como água ou soluções eletrolíticas, favorece significativamente a ocorrência da corrosão em metais expostos ao ambiente (REVIE, 2008; NETO, 2017).

Conforme Gentil (2011), a importância do estudo da corrosão está diretamente relacionada aos impactos econômicos e operacionais causados por esse fenômeno. Diversos setores industriais dependem da utilização de estruturas e equipamentos metálicos expostos a condições ambientais que favorecem o processo corrosivo. A deterioração desses materiais pode comprometer a segurança estrutural de sistemas e provocar falhas em equipamentos, além de gerar custos elevados com manutenção, reparo e substituição de componentes, o que evidencia que uma parcela significativa dos gastos industriais está associada direta ou indiretamente aos efeitos da corrosão, o que reforça a necessidade de compreender os mecanismos envolvidos nesse processo e desenvolver estratégias eficazes de prevenção e controle (CARVALHO, 2019).

Segundo a análise de Sousa (2021), outro fator que contribui para a complexidade da corrosão é a grande variedade de condições ambientais capazes de influenciar a velocidade desse processo. Variáveis como temperatura, pH, presença de sais dissolvidos, concentração de oxigênio e umidade relativa do ar podem alterar significativamente o comportamento corrosivo de um material metálico. Em ambientes aquosos, por exemplo, a presença de íons cloreto pode acelerar a degradação de certos metais, enquanto em ambientes industriais a presença de contaminantes químicos pode favorecer a formação de células de corrosão localizadas. Dessa forma, a análise das condições ambientais é fundamental para compreender a ocorrência da corrosão e prever o comportamento de materiais metálicos em serviço (GENTIL, 2011; JUNIOR, 2023).

Além disso, a corrosão pode se manifestar de diferentes formas dependendo das características do material e do ambiente ao qual ele está exposto. Entre os tipos mais comuns encontram-se a corrosão uniforme, que ocorre de maneira relativamente homogênea em toda a superfície do material, e a corrosão localizada, que se concentra em regiões específicas e pode provocar danos mais severos mesmo quando a perda de material global é pequena (GENTIL, 2011). Existem ainda mecanismos mais específicos, como corrosão galvânica, corrosão intergranular e corrosão sob tensão, cada um associado a condições particulares de operação e composição dos materiais. O entendimento desses diferentes mecanismos é essencial para a

seleção adequada de materiais e para o desenvolvimento de métodos eficientes de proteção contra corrosão (BARROS et al., 2025).

2.1.1 Metais Ferrosos e Não Ferrosos

No estudo da corrosão é importante distinguir os diferentes tipos de materiais metálicos, especialmente no que se refere aos metais ferrosos e não ferrosos. Esses materiais estão entre os mais utilizados na indústria devido às suas propriedades mecânicas e ao seu custo relativamente baixo. Entretanto, também são particularmente suscetíveis ao processo de oxidação na presença de oxigênio e umidade, resultando na formação da ferrugem, que é composta principalmente por óxidos hidratados de ferro. A ferrugem apresenta baixa aderência e pouca resistência mecânica, o que contribui para a continuidade da degradação do material ao longo do tempo (GENTIL, 2011; REVIE, 2008).

Por outro lado, os metais não ferrosos, como alumínio, zinco, cobre e suas ligas, também podem sofrer processos de corrosão quando expostos a determinados ambientes. Contudo, diferentemente dos metais ferrosos, esses materiais não formam ferrugem (GENTIL, 2011). De acordo com Neto (2017), em muitos casos, a oxidação desses metais resulta na formação de camadas superficiais relativamente estáveis que podem atuar como barreiras protetoras contra a progressão da corrosão. Um exemplo conhecido é o alumínio, que forma uma fina camada de óxido que protege o material contra a continuidade do processo corrosivo em determinadas condições ambientais.

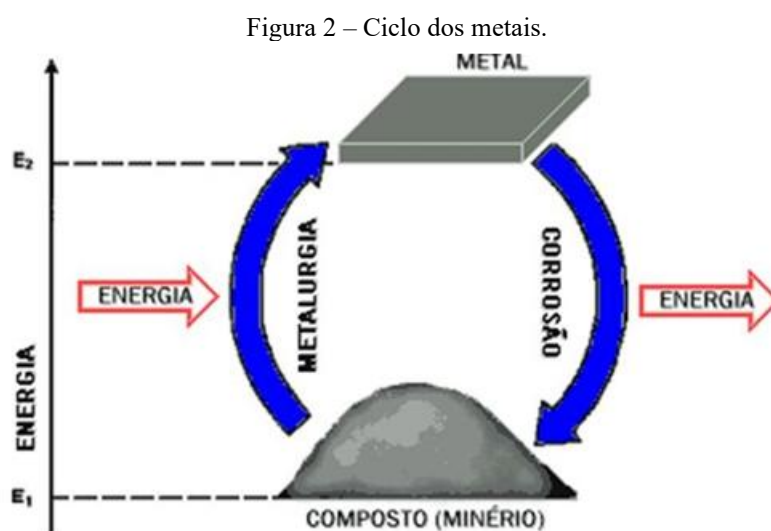
2.1.2 Aspectos gerais

Conforme apresentado por Gentil (2011), os processos corrosivos estão diretamente relacionados às transformações que ocorrem na superfície dos materiais metálicos quando estes entram em contato com o meio ambiente. Essas transformações dependem de diversos fatores, como composição do material, presença de umidade, concentração de oxigênio e características do eletrólito presente no meio. Para Sousa et al. (2021), em condições favoráveis, essas interações podem levar ao início de reações que promovem a degradação progressiva do material metálico, afetando suas propriedades físicas e estruturais ao longo do tempo. A intensidade com que esses processos ocorrem varia conforme as condições ambientais e as características do material exposto.

Na visão de Neto (2017), um dos conceitos importantes para compreender o comportamento dos metais em relação à corrosão é o chamado ciclo dos metais, que descreve

as etapas envolvidas desde a obtenção do metal a partir do minério até sua degradação após o uso. Durante os processos metalúrgicos, os minerais são submetidos a tratamentos químicos e térmicos para a obtenção do metal em estado metálico. Após sua utilização em diferentes aplicações industriais, esses materiais podem sofrer processos de deterioração que levam à formação de compostos semelhantes àqueles presentes nos minerais originais. Esse comportamento evidencia a relação existente entre os processos industriais de obtenção dos metais e os fenômenos naturais responsáveis por sua degradação (GENTIL, 2011).

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática desse fenômeno, ilustrando o ciclo dos metais e as transformações envolvidas entre os processos de extração, utilização e deterioração dos materiais metálicos.



Fonte: Dutra e Nunes, (1999).

Além das transformações químicas envolvidas, os processos de corrosão podem ocorrer por diferentes mecanismos dependendo das condições do meio. De modo geral, a corrosão é classificada em dois grandes grupos principais: corrosão química e corrosão eletroquímica. A corrosão química ocorre quando há reação direta entre o material metálico e o meio agressivo, normalmente na ausência de uma fase líquida. Esse tipo de processo é frequentemente observado em ambientes contendo gases ou vapores em temperaturas elevadas, como em equipamentos industriais expostos a atmosferas provenientes de processos de combustão (GENTIL, 2011).

Por outro lado, a corrosão eletroquímica ocorre na presença de um eletrólito capaz de permitir o transporte de íons e o fluxo de corrente elétrica. Nesse tipo de mecanismo, pequenas diferenças de potencial podem surgir em regiões distintas da superfície do material metálico, originando áreas anódicas e catódicas.

De acordo com Gentil (2011), para que o processo de corrosão eletroquímica ocorra, é necessária a presença simultânea de alguns elementos fundamentais que constituem uma célula de corrosão. De modo geral, esses elementos podem ser descritos da seguinte forma:

- **Ânodo:** região onde ocorre a reação de oxidação do metal, caracterizada pela perda de elétrons e pela dissolução do material na forma de íons metálicos.
- **Cátodo:** região onde ocorrem as reações de redução, geralmente envolvendo espécies presentes no meio, como oxigênio dissolvido ou íons hidrogênio.
- **Eletrólito:** meio condutor contendo íons, geralmente uma solução aquosa, responsável pelo transporte de carga iônica entre as regiões anódicas e catódicas.
- **Circuito metálico:** caminho condutor que permite o fluxo de elétrons entre as regiões anódica e catódica através do próprio material metálico.

A presença simultânea desses elementos é essencial para o estabelecimento de uma célula eletroquímica de corrosão, permitindo a continuidade das reações que levam à degradação do material metálico quando exposto a ambientes favoráveis ao processo corrosivo (GENTIL, 2011).

2.2 FUNDAMENTOS ELETROQUÍMICOS DA CORROSÃO

Para Revie (2008), grande parte dos processos de corrosão observados em materiais metálicos ocorre por meio de mecanismos eletroquímicos. Nesse tipo de processo, reações de oxidação e redução acontecem simultaneamente em diferentes regiões da superfície do metal quando este se encontra em contato com um meio capaz de conduzir corrente elétrica, geralmente uma solução contendo íons dissolvidos. A presença de um eletrólito permite o transporte de cargas iônicas, enquanto o próprio metal atua como condutor para o fluxo de elétrons gerados nas reações eletroquímicas. Como resultado dessas interações, estabelece-se uma célula eletroquímica natural responsável pela continuidade do processo corrosivo (GENTIL, 2011).

Nos processos eletroquímicos de corrosão, a reação fundamental ocorre na forma de duas reações parciais complementares. A primeira corresponde à reação anódica, na qual ocorre a oxidação do metal. Nesse processo, os átomos metálicos perdem elétrons e passam para o meio na forma de íons positivos. Um exemplo típico pode ser representado pela oxidação do ferro, conforme a Equação (1):



Essa reação representa a dissolução do metal na região anódica da superfície, sendo responsável pela perda de material observada durante o processo corrosivo (GENTIL, 2011; NETO, 2017).

Simultaneamente à reação anódica, ocorre uma reação catódica, na qual os elétrons liberados são consumidos em processos de redução envolvendo espécies presentes no meio. Entre as reações catódicas mais comuns estão a redução do oxigênio dissolvido e a redução de íons hidrogênio. Em meios neutros ou alcalinos, a redução do oxigênio é frequentemente representada pela Equação (2).



Já em meios ácidos, pode ocorrer a redução de íons hidrogênio, conforme mostrado na Equação (3):



Essas reações catódicas desempenham papel fundamental na manutenção do equilíbrio eletroquímico do sistema, permitindo que o fluxo de elétrons proveniente da reação anódica seja continuamente consumido (REVIE, 2008; GENTIL, 2011; PONTE, 2003).

O funcionamento de uma célula eletroquímica de corrosão depende da presença simultânea de regiões anódicas e catódicas interligadas por um caminho condutor para os elétrons e por um meio eletrolítico capaz de transportar íons. Nessas condições, estabelece-se um circuito eletroquímico no qual os elétrons fluem através do metal enquanto os íons se movimentam através do eletrólito. Esse processo mantém a continuidade das reações de oxidação e redução, permitindo que a corrosão prossiga enquanto as condições ambientais forem favoráveis ao seu desenvolvimento (NETO, 2017; GENTIL, 2011).

Além disso, pequenas diferenças de composição, tensões internas, heterogeneidades microestruturais ou variações na concentração de oxigênio podem ser suficientes para originar regiões com diferentes potenciais eletroquímicos na superfície do material metálico. Essas diferenças dão origem a microcélulas de corrosão que atuam como pequenas pilhas eletroquímicas distribuídas ao longo da superfície do metal. Esse comportamento explica por que a corrosão pode ocorrer de maneira localizada em determinadas regiões do material, mesmo quando as condições ambientais parecem uniformes (BARROS, 2015; GENTIL, 2011).

2.2.1 Formas de corrosão

A corrosão pode se manifestar de diferentes maneiras na superfície dos materiais metálicos, dependendo das condições ambientais, da composição do material e dos mecanismos eletroquímicos envolvidos no processo (GENTIL, 2011). Para Revie (2008), essas diferentes manifestações são conhecidas como formas de corrosão, sendo classificadas de acordo com o modo como o ataque corrosivo se distribui na superfície do metal e com as características morfológicas observadas durante o processo de degradação. A identificação dessas formas é fundamental para a compreensão do comportamento corrosivo dos materiais e para o desenvolvimento de estratégias adequadas de controle e prevenção da corrosão em aplicações industriais e estruturais (CARVALHO, 2019).

De modo geral, as formas de corrosão podem ser diferenciadas a partir do padrão de ataque observado na superfície metálica, podendo ocorrer de forma relativamente uniforme ou concentrar-se em regiões específicas do material. Em situações nas quais o processo corrosivo ocorre de maneira distribuída, observa-se uma perda gradual e relativamente homogênea da espessura do material ao longo da superfície exposta. Em contrapartida, quando o ataque corrosivo ocorre de forma localizada, o processo pode gerar cavidades, fissuras ou regiões de intensa degradação, capazes de comprometer significativamente a integridade estrutural do componente metálico mesmo quando a perda total de material é relativamente pequena (REVIE, 2008; GENTIL, 2011; NETO, 2017).

Essas diferentes manifestações do fenômeno corrosivo estão diretamente associadas às condições eletroquímicas estabelecidas na interface entre o metal e o meio ao qual ele está exposto (REVIE, 2008). Para Carvalho (2019), variações na composição química do material, na microestrutura, na presença de tensões mecânicas e nas condições do ambiente podem favorecer a formação de regiões com potenciais eletroquímicos distintos na superfície metálica, originando células de corrosão que conduzem ao desenvolvimento de diferentes formas de ataque. Dessa forma, a análise das manifestações da corrosão permite compreender os mecanismos responsáveis pela deterioração do material e auxilia na identificação das condições que favorecem o avanço do processo corrosivo (JUNIOR, 2023).

A Figura 3 apresenta um quadro ilustrativo contendo exemplos representativos de diferentes manifestações da corrosão observadas em superfícies metálicas. Essas imagens evidenciam as principais características visuais associadas às diversas formas de ataque corrosivo que podem ocorrer em materiais metálicos submetidos a ambientes agressivos.

Figura 3 – Exemplos representativos das principais formas de corrosão observadas em superfícies metálicas



Fonte: Gentil, (2011).

Além disso, o reconhecimento das diferentes formas de corrosão também possui grande importância em estudos de integridade estrutural e análise de falhas em componentes metálicos (GENTIL, 2011). De acordo com Carvalho (2019), a avaliação do padrão de ataque corrosivo permite inferir informações relevantes sobre o ambiente ao qual o material esteve exposto, bem como sobre os mecanismos eletroquímicos que atuaram durante o processo de degradação. Barros et al. (2015) destaca que a caracterização das formas de corrosão contribui para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de monitoramento, manutenção e aumento da vida útil de estruturas metálicas submetidas a condições potencialmente corrosivas.

2.3 POTENCIAL DE ELETRODO

O potencial de eletrodo é um dos conceitos fundamentais para a compreensão dos processos eletroquímicos associados à corrosão. Esse potencial representa a tendência que um material possui de perder ou ganhar elétrons quando em contato com um eletrólito. Em sistemas metálicos, o potencial de eletrodo está diretamente relacionado à capacidade de um metal sofrer oxidação ou participar de reações eletroquímicas quando exposto a um determinado ambiente. Dessa forma, o estudo dos potenciais eletroquímicos permite compreender o comportamento dos metais em meios corrosivos e prever quais materiais apresentam maior ou menor tendência à corrosão (GENTIL, 2011; REVIE, 2008).

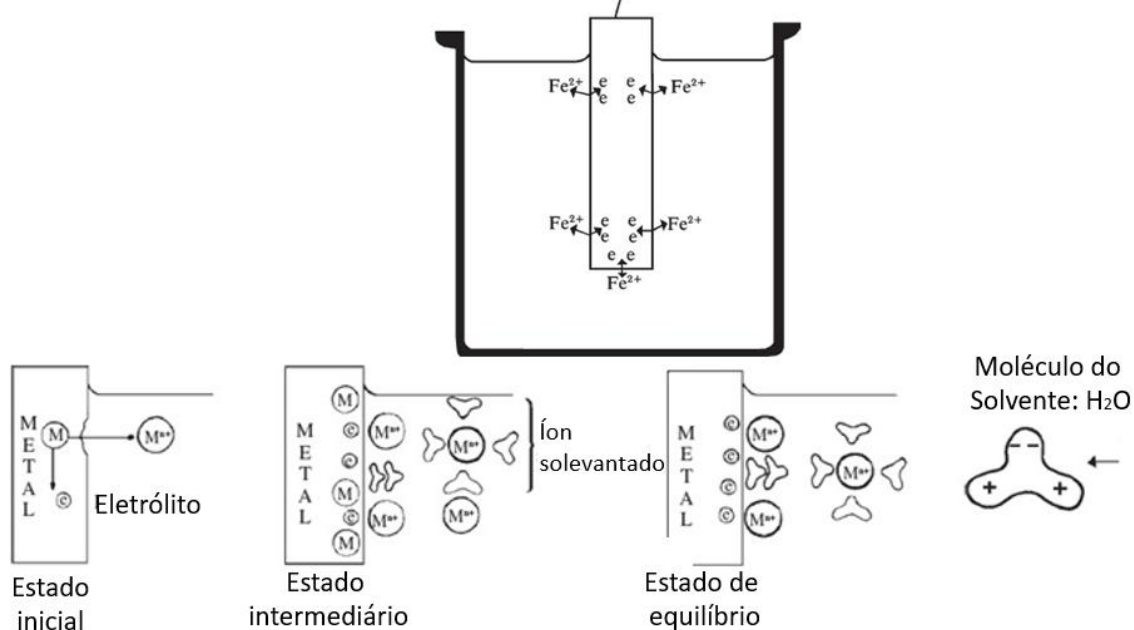
Quando um metal é colocado em contato com uma solução eletrolítica, ocorre uma interação entre os átomos metálicos e os íons presentes na solução. Parte dos átomos do metal pode se transformar em íons metálicos, liberando elétrons que permanecem na estrutura metálica. Esse processo gera uma diferença de potencial elétrico entre o metal e a solução, estabelecendo o chamado potencial de eletrodo. Esse potencial depende tanto das características do material quanto da composição do eletrólito, da temperatura e da concentração das espécies químicas presentes no meio (GENTIL, 2011; REVIE, 2008).

2.3.1 Formação do potencial de eletrodo

A formação do potencial de eletrodo ocorre devido ao equilíbrio entre as reações de dissolução do metal e as reações de deposição de íons metálicos provenientes da solução. Quando um metal é imerso em um eletrólito contendo seus próprios íons, estabelece-se um equilíbrio dinâmico entre os átomos que deixam a superfície metálica e aqueles que retornam ao metal a partir da solução. Esse equilíbrio gera uma diferença de potencial característica para cada sistema metal-eletrólito (REVIE, 2008).

Esse fenômeno pode ser representado esquematicamente conforme ilustrado na Figura 4, que mostra o processo de formação do potencial de eletrodo em uma interface metal-solução.

Figura 4 – Formação do potencial de eletrodo na interface metal/eletrolito



A Figura 4 representa a formação de uma dupla camada elétrica na interface entre o metal e o eletrólito. Nessa região ocorre a separação de cargas elétricas: os elétrons permanecem no metal enquanto os íons metálicos se distribuem na solução próxima à superfície. A formação dessa dupla camada resulta em uma diferença de potencial elétrico que caracteriza o potencial de eletrodo do sistema. Esse fenômeno é essencial para o estabelecimento das reações eletroquímicas associadas aos processos de corrosão (GENTIL, 2011; NETO, 2017).

2.3.2 Série eletroquímica dos metais

A comparação entre os potenciais de eletrodo de diferentes metais permite estabelecer a chamada série eletroquímica, que organiza os metais de acordo com sua tendência à oxidação ou redução. Metais com potenciais mais negativos apresentam maior tendência a perder elétrons e, portanto, são mais suscetíveis à corrosão. Por outro lado, metais com potenciais mais positivos apresentam maior estabilidade eletroquímica e menor tendência à oxidação (GENTIL, 2011; REVIE, 2008).

A organização desses potenciais é apresentada na Figura 5, que mostra um exemplo da série eletroquímica de alguns metais em solução aquosa.

Figura 5 – Série eletroquímica de alguns metais

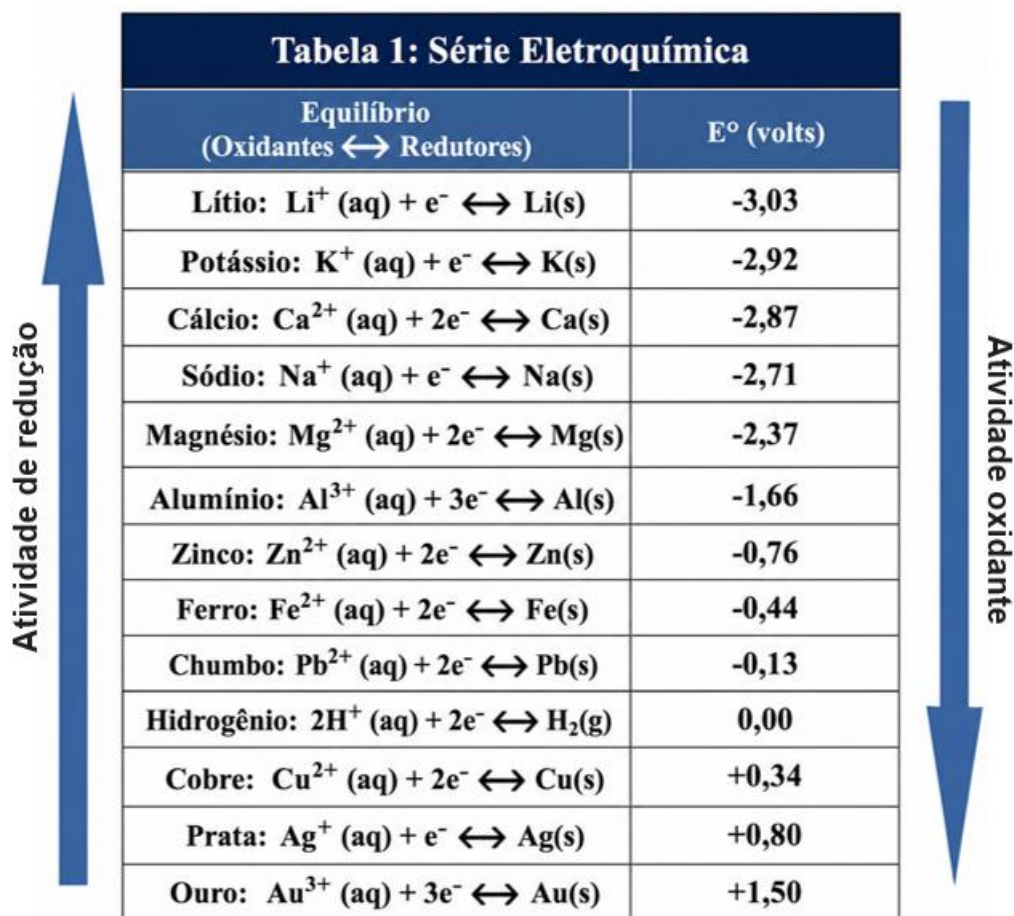


Tabela 1: Série Eletroquímica

Equilíbrio (Oxidantes $\leftrightarrow$ Redutores)	E° (volts)
Lítio: $\text{Li}^+ (\text{aq}) + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Li}(\text{s})$	-3,03
Potássio: $\text{K}^+ (\text{aq}) + \text{e}^- \leftrightarrow \text{K}(\text{s})$	-2,92
Cálcio: $\text{Ca}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Ca}(\text{s})$	-2,87
Sódio: $\text{Na}^+ (\text{aq}) + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Na}(\text{s})$	-2,71
Magnésio: $\text{Mg}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Mg}(\text{s})$	-2,37
Alumínio: $\text{Al}^{3+} (\text{aq}) + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{Al}(\text{s})$	-1,66
Zinco: $\text{Zn}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Zn}(\text{s})$	-0,76
Ferro: $\text{Fe}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe}(\text{s})$	-0,44
Chumbo: $\text{Pb}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}(\text{s})$	-0,13
Hidrogênio: $2\text{H}^+ (\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2(\text{g})$	0,00
Cobre: $\text{Cu}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cu}(\text{s})$	+0,34
Prata: $\text{Ag}^+ (\text{aq}) + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Ag}(\text{s})$	+0,80
Ouro: $\text{Au}^{3+} (\text{aq}) + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{Au}(\text{s})$	+1,50

Fonte: Medium, (2022).

Conforme apresentado na Figura 5, metais como magnésio, zinco e ferro ocupam posições mais negativas na série eletroquímica, indicando maior tendência à oxidação. Já metais como cobre, prata e ouro apresentam potenciais mais positivos, o que indica maior estabilidade química. Essa diferença de potencial entre materiais distintos é responsável pela formação de pares galvânicos quando dois metais diferentes entram em contato em um mesmo eletrólito. Esse conceito é amplamente utilizado na engenharia para prever o comportamento corrosivo de sistemas metálicos e no desenvolvimento de técnicas de proteção contra corrosão, como a proteção catódica e o uso de ânodos de sacrifício (GENTIL, 2011; REVIE, 2008; CARVALHO, 2019).

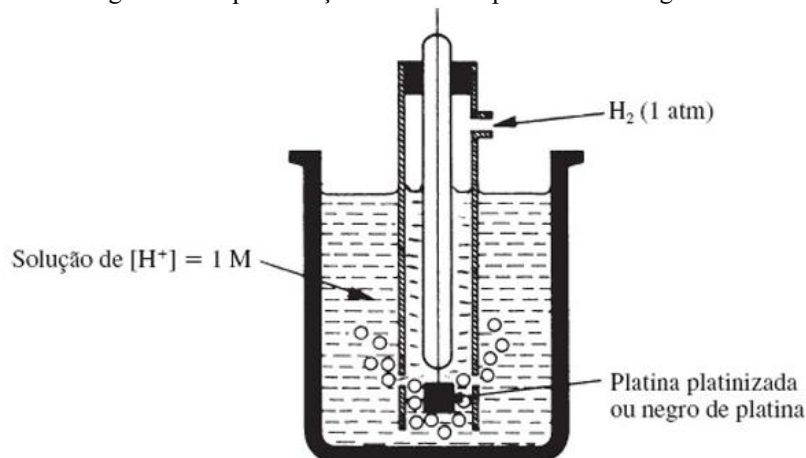
2.3.3 Potencial padrão de eletrodo

Para permitir a comparação entre diferentes materiais, foram estabelecidas condições padronizadas para a medição dos potenciais de eletrodo. Nessas condições, conhecidas como condições padrão, os potenciais são medidos em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, que possui potencial definido como zero volt. Esse eletrodo consiste em uma placa de platina em

contato com hidrogênio gasoso e uma solução contendo íons hidrogênio em condições específicas de pressão e concentração (GENTIL, 2011; REVIE, 2008).

A representação esquemática de um sistema de medição de potencial padrão de eletrodo é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Representação do eletrodo padrão de hidrogênio



Fonte: Gentil, (2011).

A partir desse eletrodo de referência é possível determinar os potenciais padrão de diferentes metais, permitindo a construção de tabelas eletroquímicas amplamente utilizadas em estudos de corrosão. Esses valores fornecem informações importantes sobre a tendência relativa dos metais em sofrer reações de oxidação ou redução em sistemas eletroquímicos (GENTIL, 2011; REVIE, 2008).

2.3.4 Influência do potencial de eletrodo na corrosão

O potencial de eletrodo desempenha papel fundamental no desenvolvimento dos processos corrosivos, pois determina quais regiões de um sistema metálico atuarão como ânodo ou cátodo em uma célula eletroquímica (GENTIL, 2011). Em sistemas reais, pequenas variações de composição, microestrutura ou condições ambientais podem gerar diferenças de potencial na superfície do material, originando microcélulas eletroquímicas responsáveis pelo início do processo de corrosão (NETO, 2017).

Esse comportamento pode ser representado por meio de curvas de polarização, que descrevem a relação entre o potencial eletroquímico e a densidade de corrente associada às reações de oxidação e redução.

A interseção entre as curvas anódica e catódica define o potencial de corrosão do sistema, bem como a densidade de corrente associada ao processo corrosivo. Esses parâmetros são amplamente utilizados em estudos eletroquímicos para avaliar a resistência à corrosão de

diferentes materiais e determinar a eficiência de métodos de proteção anticorrosiva (GENTIL, 2011; REVIE, 2008; JUNIOR, 2023).

2.3.5 Aplicação do potencial de eletrodo no estudo da corrosão

Para Junior (2023), O conhecimento do potencial de eletrodo também é fundamental para o desenvolvimento de técnicas de monitoramento da corrosão. Métodos eletroquímicos como potencial de circuito aberto, polarização potenciodinâmica e resistência à polarização linear utilizam medições de potencial para avaliar o comportamento corrosivo de materiais em diferentes ambientes.

Essas técnicas permitem identificar alterações no comportamento eletroquímico do material ao longo do tempo, possibilitando a avaliação da eficiência de revestimentos protetores, inibidores de corrosão e sistemas de proteção catódica. Dessa forma, a análise do potencial de eletrodo constitui uma ferramenta essencial para o estudo, monitoramento e controle dos processos corrosivos em sistemas metálicos (SOUSA, 2021; CARVALHO, 2019).

2.4 POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO

O potencial de circuito aberto (Open Circuit Potential – OCP) corresponde ao potencial eletroquímico estabelecido espontaneamente entre um eletrodo metálico e um eletrodo de referência, na ausência de corrente elétrica aplicada ao sistema. Essa grandeza representa o estado de equilíbrio eletroquímico da superfície metálica e fornece informações importantes sobre o comportamento do material em um determinado meio corrosivo (ARAÚJO et al., 2025).

O potencial de corrosão é considerado um dos parâmetros eletroquímicos de mais fácil determinação experimental, uma vez que sua obtenção consiste na medição direta do potencial assumido pelo metal em relação a um eletrodo de referência, sem a imposição de corrente elétrica externa. Dessa forma, a determinação do potencial de corrosão é realizada por meio da medida do potencial de circuito aberto, técnica amplamente utilizada para avaliar a estabilidade e a tendência à corrosão dos materiais metálicos (WOLYNEC, 2003).

O valor do OCP pode ser afetado por diferentes fatores, como a composição do eletrólito, as características do material metálico, a formação de filmes passivos e a adsorção de espécies químicas sobre a superfície. Além disso, o monitoramento de sua evolução ao longo do tempo possibilita acompanhar os processos que ocorrem durante a corrosão, incluindo a formação ou dissolução de óxidos, a eficiência de inibidores de corrosão e as transições entre

os estados ativo e passivo da superfície metálica, fornecendo informações relevantes sobre o comportamento eletroquímico do material (ARAÚJO *et al.*, 2025).

2.5 BANCADAS DE ENSAIOS CORROSIVOS

As bancadas de ensaios corrosivos constituem ferramentas fundamentais para a investigação do comportamento eletroquímico dos materiais em diferentes condições de exposição. Esses sistemas possibilitam a reprodução controlada de ambientes corrosivos, permitindo avaliar parâmetros como potencial de circuito aberto, resistência à polarização, curvas de polarização potenciodinâmica e impedância eletroquímica.

Entre os primeiros avanços relacionados ao desenvolvimento de bancadas eletroquímicas destaca-se o trabalho de Ovarfort (1988), que desenvolveu uma nova célula eletroquímica destinada aos ensaios de corrosão por pites. O principal objetivo foi eliminar os efeitos da corrosão por fresta observados nas células convencionais, garantindo que o processo corrosivo ocorresse exclusivamente na superfície exposta do material.

Da mesma forma, Vitaller, Angst e Elsener (2020) apresentaram uma bancada destinada à realização de ensaios eletroquímicos sob condições de elevada temperatura e pressão, possibilitando estudos em ambientes semelhantes aos encontrados na indústria de petróleo e gás. Mais recentemente, Kiremit *et al.* (2023) desenvolveram uma microcélula de corrosão *in situ*, permitindo a observação simultânea da superfície metálica por microscopia durante a realização dos ensaios eletroquímicos, tornando possível correlacionar os mecanismos de iniciação da corrosão com os parâmetros eletroquímicos obtidos.

Em outra abordagem, Remita *et al.* (2007) desenvolveram uma célula eletroquímica de camada delgada (Thin Layer Cell), projetada para investigar processos corrosivos em ambientes aquosos confinados.

3 METODOLOGIA

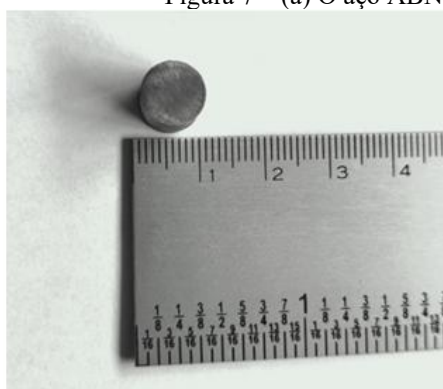
3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A seleção do material para o eletrodo de trabalho (corpo de prova), consistiu em empregar o aço ABNT 1020 (composição química na Tabela 1). A escolha desse material justifica-se principalmente pela sua ampla utilização e elevada demanda em diversos setores industriais, devido às suas características e versatilidade de aplicação

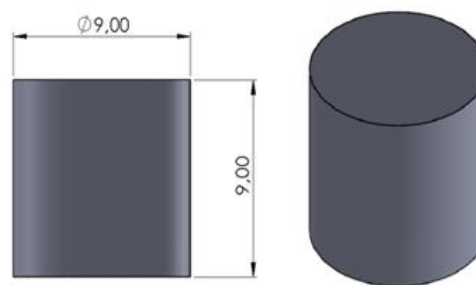
Tabela 1 – Composição (%) química do aço carbono ABNT 1020			
C	Mn	P Máx.	S Máx.
0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,03	0,05

O aço ABNT 1020 (Figura 7 a) foi usinado por um torno (marca WESS e modelo CD6241 x 1500), usando os seguintes parâmetros: avanço de 0,04 mm/passe; profundidade de corte de 0,2 mm; rotação de 330 rpm; não foi utilizado fluido de corte; como ferramenta de corte, bit de aço rápido; contendo uma dimensão final de 9 mm de comprimento e um diâmetro de 9 mm (Figura 7 b).

Figura 7 – (a) O aço ABNT 1020; (b) dimensões finais do aço



Fonte: Autoria própria.

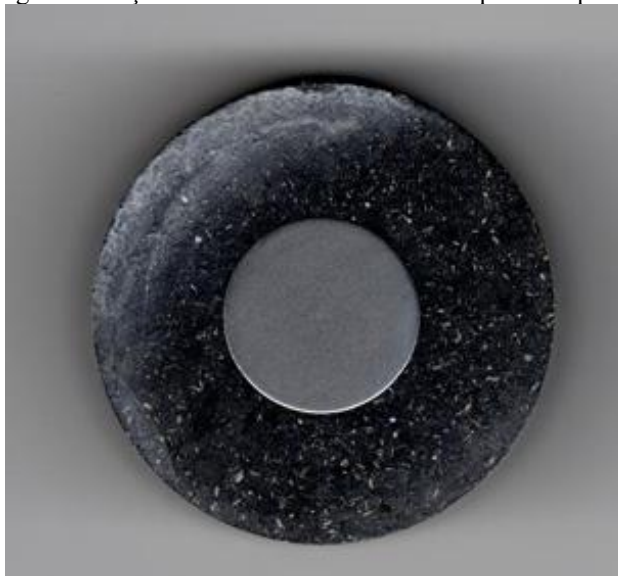


Fonte: Autoria própria.

Fonte: Autoria própria, (2026).

Com a finalidade de obter imagens a respeito da microestrutura do aço. A amostra do aço foi retirada por um corte na direção axial e embutidas em baquelite à quente (figura 8).

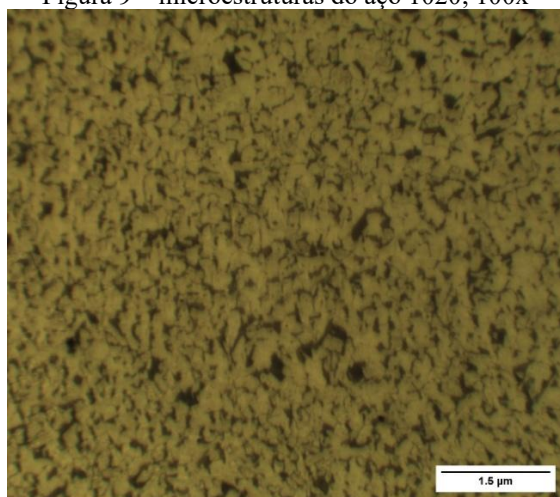
Figura 8 – Aço ABNT 1020 embutido em baquelite a quente



Fonte: Autoria própria, (2026).

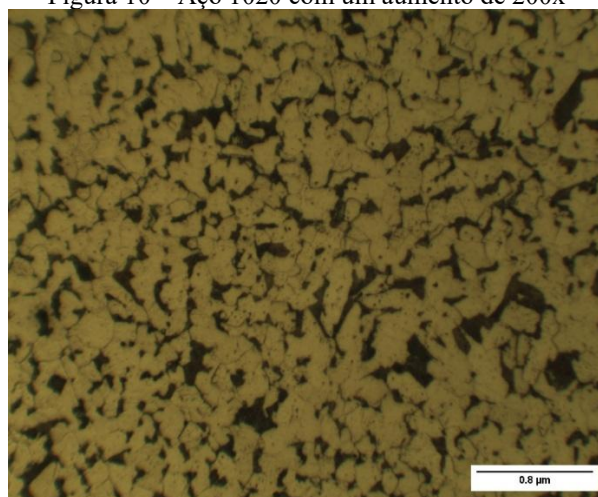
Para a caracterização microestrutural do aço 1020, o corpo de prova passou por preparação metalográfica com lixamento por diferentes tipos de granulometria (80, 100, 200, 400, 600, 1200 e 2000), polimento (alumina com granulometria de 1 e 0,5 μm), e ataque químico por imersão de 5 segundos seguidos em uma solução de Nital 2%. As micrografias foram capturadas com um microscópio óptico Opton, as Figuras 9 e 10 apresentam as microestruturas do aço ABNT 1020.

Figura 9 – microestruturas do aço 1020, 100x



Fonte: Autoria própria, (2026).

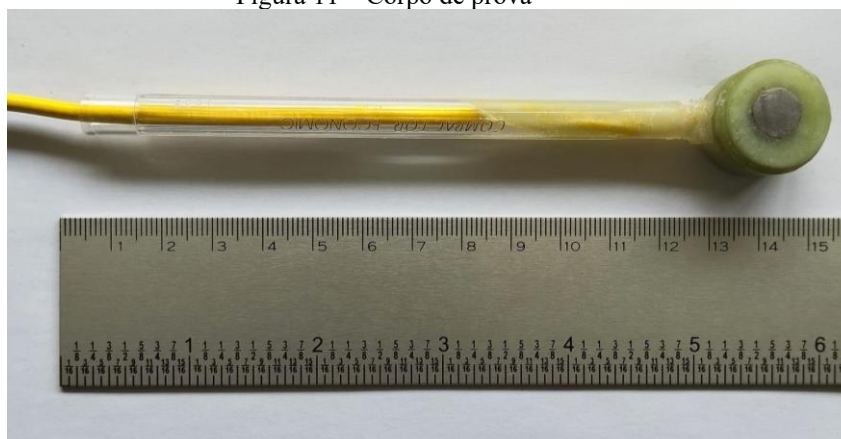
Figura 10 – Aço 1020 com um aumento de 200x



Fonte: Autoria própria, (2026).

Logo em seguida, foi feita a soldagem do aço com um fio elétrico e o embutimento com resina poliéster, com uma área exposta ao meio corrosivo de 0,636 cm^2 (Figura 11).

Figura 11 – Corpo de prova



Fonte: Autoria própria.

3.2 SOLUÇÃO DE TRABALHO

A solução salina utilizada como eletrólito foi preparada através da dissolução de (250 ± 5) g de cloreto de sódio (5% de NaCl) em um volume de água destilada, permitindo a obtenção de 5 L de solução, à temperatura ambiente. Foram realizadas medições do pH da água destilada e da solução preparada, obtendo-se os valores de 7,0 e 7,4, respectivamente. Ressalta-se que o sal empregado foi previamente submetido a um processo de dessecação em uma estufa. A asseguarção da confiabilidade foi efetuada com a utilização de uma balança analítica para a mensuração do soluto e um recipiente de vidro para a homogeneização da solução através da agitação manual.

3.4 CÓDIGO DE INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA ARDUINO UNO

Para a aquisição de dados do sistema, foi desenvolvido um programa, apresentado no Anexo, destinado à plataforma Arduino Uno, responsável pela leitura e pelo processamento dos sinais provenientes de um sensor de corrente ACS712 de 5 A e de um sensor de tensão. O sistema realiza a aquisição dos valores analógicos, aplica tratamento digital aos dados e disponibiliza os resultados por meio da comunicação serial.

De acordo com o sistema proposto, durante a realização dos ensaios de corrosão, a aquisição dos dados ocorre conforme a programação estabelecida no sistema de automação, sendo as medições coletadas em tempo real e posteriormente armazenadas em um computador para fins de análise e elaboração de gráficos.

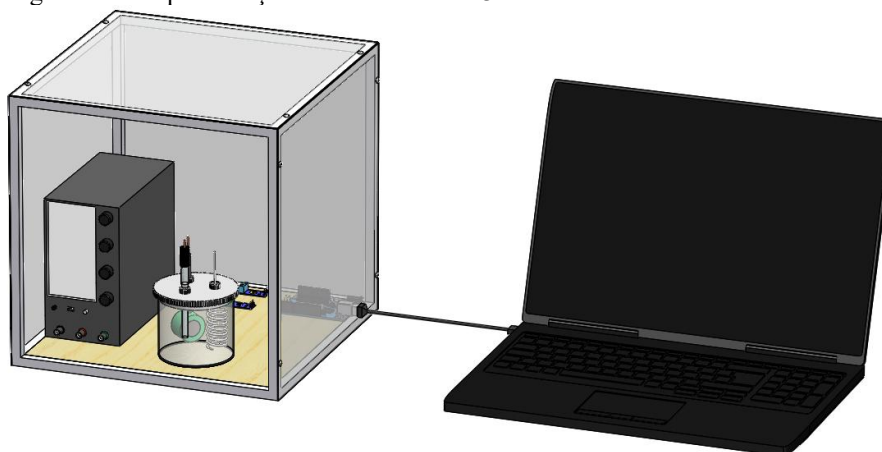
Em síntese, o programa executa a leitura dos sensores, aplica filtragem por média móvel aos dados de corrente, converte os valores obtidos em grandezas físicas correspondentes, realiza

ajustes e calibração e apresenta continuamente os resultados na porta serial a cada ciclo de execução da função principal.

3.5 MODELAGEM CAD 3D DO PROJETO

A modelagem do projeto foi desenvolvida utilizando um software de CAD (Computer Aided Design) 3D, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Representação do modelo CAD 3D da bancada de ensaios corrosivos



Fonte: autoria própria, (2026).

O modelo CAD 3D elaborado representa a bancada de ensaios corrosivos proposta neste trabalho. A bancada foi projetada de forma a permitir a realização voltados ao monitoramento do processo de corrosão em materiais metálicos.

Entre os elementos presentes na bancada destacam-se a fonte de tensão, um sensor de corrente, um sensor de tensão, um microcontrador Arduino, e a célula de corrosão. No interior da célula encontram-se os três eletrodos: o eletrodo de trabalho (corpo de prova), o eletrodo de referência e o contra eletrodo.

A modelagem tridimensional da bancada permitiu visualizar a disposição espacial dos componentes, facilitando o planejamento da montagem experimental, bem como a análise da organização do sistema antes de sua construção física.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as discussões serão embasados na construção da bancada de ensaios corrosivos, funcionamento, aspectos gerais dos testes e orçamento da bancada.

4.1 MONTAGEM DA BANCADA

A bancada de ensaios corrosivos foi projetada visando uma operação simples, segura e confiável (Figura 13). O equipamento tem como finalidade a realização de testes eletroquímicos, permitindo a análise do comportamento corrosivo do eletrodo de trabalho (corpo de prova) imerso em uma solução eletrolítica.

Figura 13 – Bancada de ensaio Corrosivos



Fonte: Autoria própria, (2026).

A estrutura da bancada foi dimensionada considerando critérios de resistência mecânica e custo-benefício. Para isso, utilizou-se o metalon como material estrutural, devido à sua elevada resistência e boa durabilidade. O fechamento da estrutura foi realizado com chapas de acrílico escuro, aplicadas nas faces laterais, traseira e superior, sendo fixadas por meio de parafusos, o que facilita eventuais manutenções. Ressalta-se que a parte frontal da bancada permaneceu aberta, com o objetivo de permitir melhor acesso ao sistema experimental.

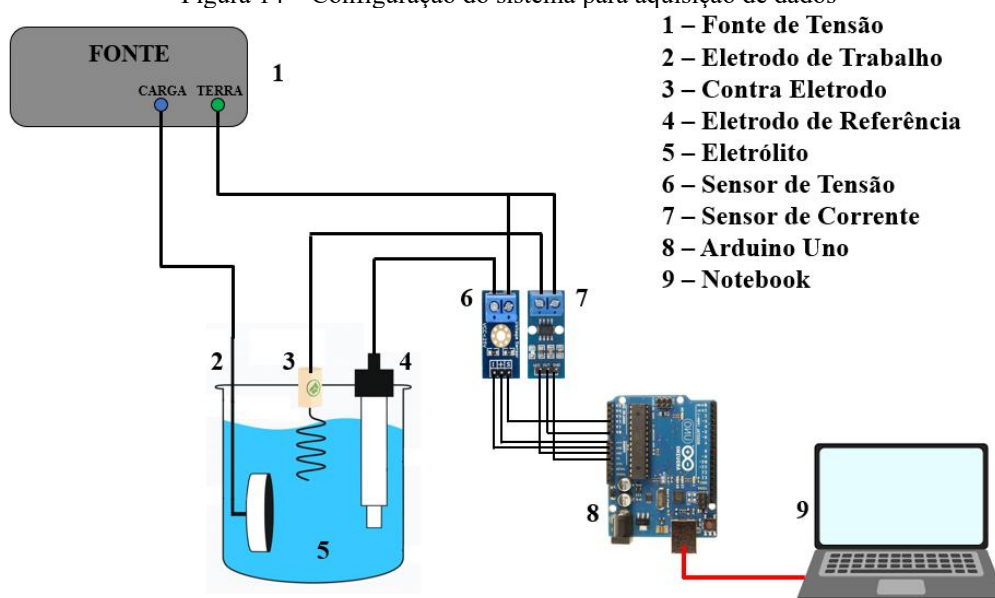
O sistema experimental é constituído por uma célula eletroquímica composta por um recipiente de vidro com capacidade de 100 mL de solução.

O sistema é composto por três eletrodos: o eletrodo de trabalho (corpo de prova), um eletrodo de referência de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) e um contraeletrodo constituído por fio de níquel-cromo (NiCr). A solução eletrolítica utilizada consiste em uma solução salina de cloreto de sódio (NaCl).

Para a realização dos ensaios, foi montado um arranjo experimental composto por uma fonte de tensão responsável pela aplicação da corrente e tensão no sistema. A tensão e a corrente elétrica são conduzidas até o eletrodo de trabalho, promovendo a polarização eletroquímica do material. Como consequência, ocorrem reações de oxidação e redução na interface metal/eletrólito, caracterizando o processo de corrosão.

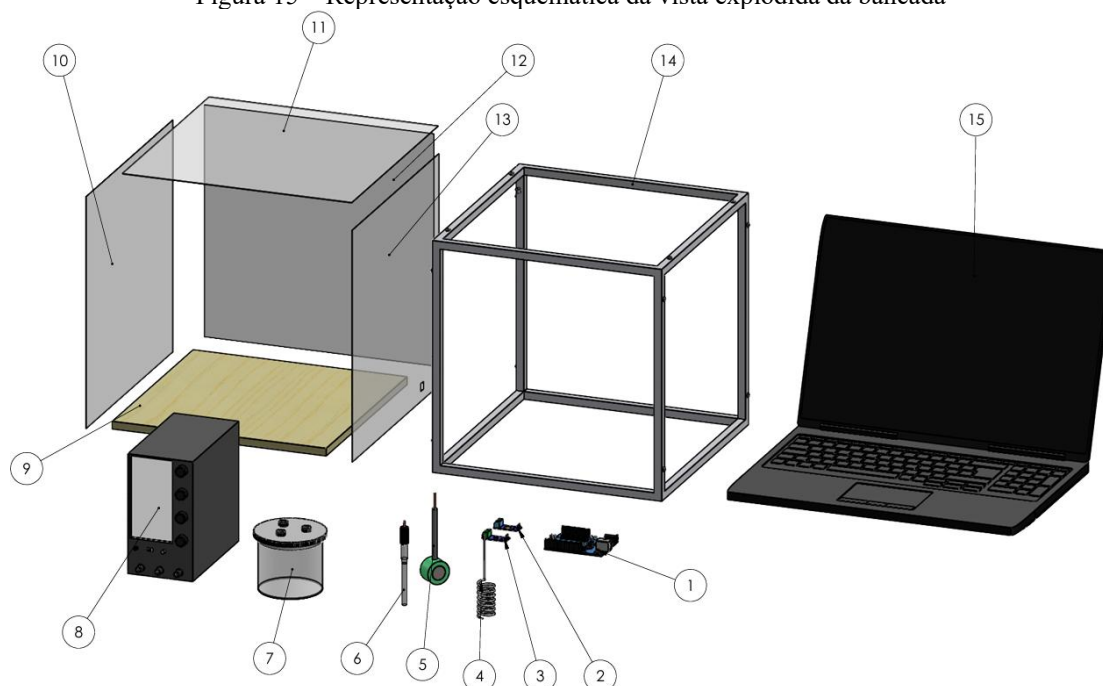
A aquisição de dados foi realizada por meio de um sensor de tensão de 25 V DC e de um sensor de corrente ACS712 de 5 A, integrados a um microcontrolador Arduino, possibilitando o monitoramento das variações de tensão e corrente ao longo dos ensaios. Os experimentos foram conduzidos em condições de temperatura ambiente e pressão atmosférica. O detalhamento da montagem do sistema para aquisição de dados e a bancada experimental são mostradas nas figuras 14 e 15, respectivamente.

Figura 14 – Configuração do sistema para aquisição de dados



Fonte: Autoria própria, (2026).

Figura 15 – Representação esquemática da vista explodida da bancada



Fonte: Autoria própria, (2026).

A Tabela 2 apresenta a descrição de cada um dos principais componentes da bancada de ensaios corrosivos que estão evidenciados na vista explodida da Figura 15.

Tabela 2 – componentes da bancada		
Nº DO ITEM	NOME DO COMPONENTE	QUANTIDADE
1	Micro-controlador Arduino	1
2	Sensor de Tensão	1
3	Sensor de Corrente	1
4	Contra Eletrodo	1
5	Eletrodo de Trabalho	1
6	Eletrodo de Referência	1
7	Recipiente de Vidro	1
8	Fonte de Tensão	1
9	Chapa de Compensado	1
10	Chapa Lateral	1
11	Chapa Superior	1
12	Chapa Traseira	1
13	Chapa Lateral	1
14	Estrutura de Sustentação	1
15	Notebook	1

Fonte: Autoria própria, (2026).

De acordo com o sistema proposto, durante a realização dos ensaios de corrosão, a aquisição de dados é realizada conforme a programação desenvolvida, e posteriormente as medidas são salvas no computador, em seguida, são utilizadas para criação dos gráficos.

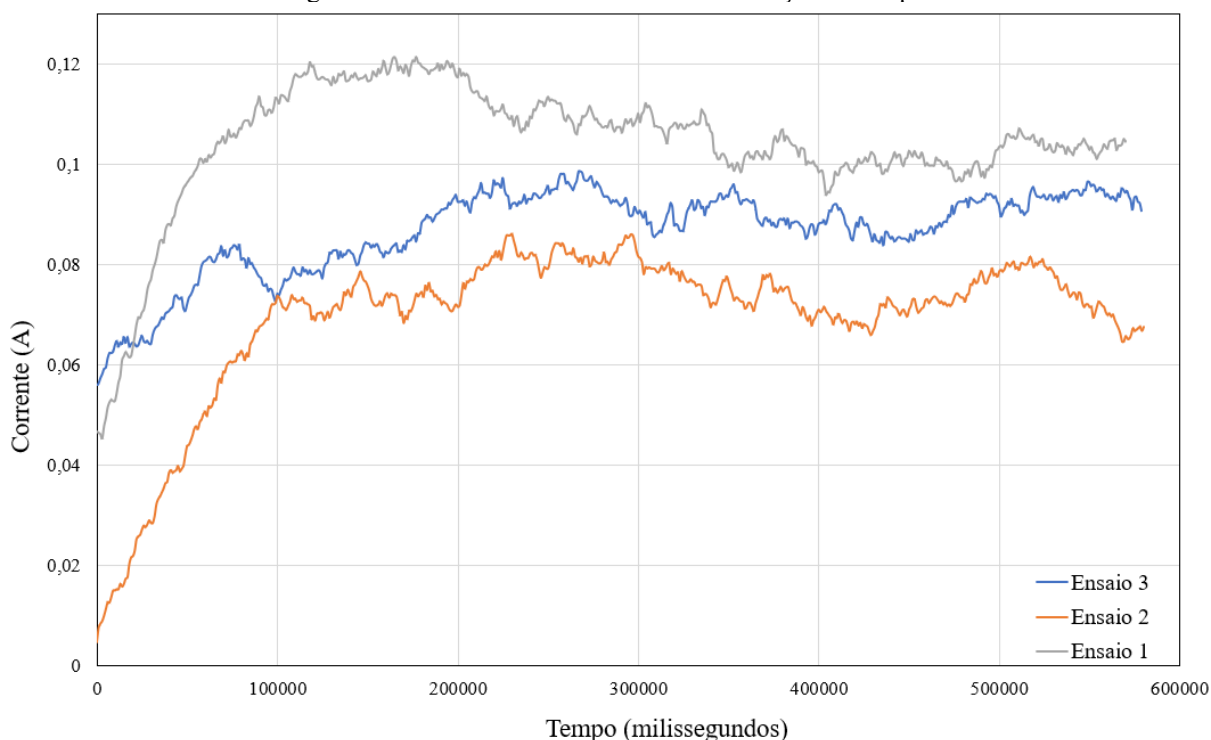
4.2 FUNCIONAMENTO DA BANCADA

A partir da utilização da bancada de ensaios corrosivos desenvolvida, foi possível obter curvas de corrente em função do tempo. Foram realizados três ensaios experimentais, sob aplicação de uma tensão de 300 mV, em um volume de 80 ml de solução, com uma duração de 10 minutos cada.

Com o objetivo de garantir a confiabilidade dos resultados, antes de cada ensaio o sistema foi mantido em repouso por um período de 15 minutos, visando a estabilização do potencial de circuito aberto (OCP). Esse procedimento é fundamental para assegurar que o sistema eletroquímico atinja condições estáveis antes do início das medições. Além disso, antes e após cada ensaio, foi realizada a limpeza dos corpos de prova conforme a norma ASTM G1-03 (2012), garantindo a remoção de produtos de corrosão e evitando interferências nos resultados subsequentes.

Os resultados obtidos demonstram que a bancada desenvolvida foi capaz de adquirir os dados requisitados, permitindo o monitoramento do comportamento eletroquímico do aço ABNT 1020 em meio salino. As medições realizadas possibilitaram a obtenção de curvas de corrente ao longo do tempo, conforme observado na Figura 16, as quais apresentaram comportamento coerente com os fenômenos descritos na literatura para processos de corrosão eletroquímica.

Figura 16 – Curvas de corrente elétrica em função do tempo



Fonte: Autoria própria, (2026).

Observa-se, nos ensaios 1 e 2, que as curvas de corrente apresentam comportamento semelhante, indicando maior estabilidade do sistema eletroquímico e boa repetibilidade entre os experimentos realizados. Em ambos os ensaios, verifica-se uma variação inicial da corrente, seguida por uma tendência de estabilização ao longo do tempo, comportamento associado ao período inicial de interação entre a superfície metálica e o eletrólito, no qual ocorrem ajustes nas reações eletroquímicas presentes na interface metal/solução.

Entretanto, o ensaio 3 apresentou um comportamento distinto em relação aos demais, com maior variação da corrente durante o período de exposição. Essa discrepância pode estar relacionada a fatores experimentais, como diferenças na preparação superficial do corpo de prova, alterações na rugosidade da superfície metálica, presença de impurezas no eletrólito ou pequenas variações nas condições de montagem da célula eletroquímica, fatores que podem influenciar diretamente a cinética das reações de corrosão.

De maneira geral, observou-se o aumento da corrente elétrica durante a exposição do aço ABNT 1020 ao meio corrosivo, evidenciando o início e a evolução das reações eletroquímicas na superfície do material. Esse comportamento está associado ao processo de oxidação do ferro presente na liga, no qual ocorre a transferência de elétrons da superfície metálica para o eletrólito, promovendo a formação de íons metálicos e o desenvolvimento progressivo dos produtos de corrosão. À medida que esses produtos se acumulam sobre a

superfície do eletrodo, ocorre uma alteração nas condições da interface metal/eletrolito, influenciando a variação da corrente medida ao longo do ensaio.

Assim, as curvas obtidas representam a evolução do comportamento eletroquímico do aço em solução de NaCl, permitindo avaliar a resposta do material quando submetido a um ambiente favorável à corrosão. Os resultados obtidos demonstram que a bancada desenvolvida foi capaz de monitorar as variações de correntes associadas ao processo corrosivo, apresentando funcionamento adequado e potencial para aplicação em estudos experimentais envolvendo a avaliação da resistência à corrosão de materiais metálicos.

4.3 ORÇAMENTO DO PROJETO

A Tabela 01 apresenta em detalhe o orçamento, especificando a quantidade necessária de cada componente e o custo total correspondente.

Tabela 3 – Custo da bancada de ensaio corrosivo

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	CUSTO TOTAL
Micro-controlador Arduino	1 Unidade	R\$ 120,00
Sensor de Tensão	1 Unidade	R\$ 26,00
Sensor de Corrente	1 Unidade	R\$ 23,00
Fio de Níquel-cromo (NiCr)	1 Unidade	R\$ 72,00
Eletrodo de Referência	1 Unidade	R\$ 130,00
Célula de Vidro	1 Unidade	R\$ 218,85
Fonte de Tensão	1 Unidade	R\$ 688,00
Parafuso Auto Brocante	200 Unidades	R\$ 34,00
Chapas Laterais e superior acrílico Placa 50x50cm	4 Unidades	R\$ 240,00
Tubo Metalon Galvanizado 20x20	6 Metros	R\$ 62,00
TOTAL		R\$ 1.613,85

Fonte: Autoria Própria, (2026).

Esse valor pode ser considerado bastante acessível quando comparado com os preços dos equipamentos de monitoramento da corrosão disponíveis no mercado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma bancada de ensaios corrosivos de baixo custo para a realização de estudos analíticos e comparativos sobre a resistência à corrosão em ligas ferro-carbono. Para isso, foi projetado e construído um sistema experimental composto por célula eletroquímica, sensores de corrente e tensão, microcontrolador Arduino e sistema de aquisição de dados, permitindo o monitoramento do comportamento eletroquímico de materiais metálicos submetidos a meios corrosivos.

Os resultados obtidos demonstraram que a bancada desenvolvida foi capaz de realizar a aquisição e o registro dos dados de corrente elétrica ao longo do tempo, possibilitando a análise do processo corrosivo do aço ABNT 1020 em solução salina de NaCl. Os ensaios realizados apresentaram comportamento compatível com os fenômenos eletroquímicos descritos na literatura, evidenciando a funcionalidade do sistema e sua capacidade de fornecer informações relevantes para o estudo da corrosão. Além disso, observou-se que os resultados obtidos nos ensaios apresentaram boa repetibilidade experimental, indicando a confiabilidade da bancada para aplicações acadêmicas e de pesquisa.

Outro ponto relevante refere-se ao custo de desenvolvimento da bancada, estimado em R\$ 1.613,85, valor significativamente inferior ao de equipamentos comerciais destinados ao monitoramento e estudo da corrosão. Dessa forma, o sistema proposto apresenta-se como uma alternativa economicamente viável para instituições de ensino, laboratórios e grupos de pesquisa que necessitam realizar estudos eletroquímicos com recursos financeiros limitados.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a implementação de sistemas de armazenamento automático dos dados em nuvem, a utilização de sensores com maior precisão, a integração de interfaces gráficas para visualização em tempo real dos resultados e a realização de ensaios com diferentes materiais metálicos, concentrações de eletrólitos e condições operacionais, ampliando as possibilidades de aplicação da bancada desenvolvida.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, João Victor de S.; PANOSSIAN, Zebhbour; MELO, Hercílio G.; COSTA, Isolda. O que o potencial de circuito aberto pode nos informar sobre a resistência à corrosão de ligas de alumínio? **Química Nova**, São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, v. 48, n. 9, 2025.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM G1-03 (Reapproved 2011): Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- BARROS; Iuri B. de et al. Casca Preciosa (Aniba canelilla) como Inibidor de Corrosão do Aço-Carbono. **Rev. Virtual Quim**, Nova Friburgo, v. 7, n. 5, p. 1743- 1755, out. 2015.
- BELLATO, João Gabriel Dareli. **ESTUDO DE CORROSÃO DO AÇO MARAGING**. 2025, Trabalho de Conclusão de Curso (Física) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2025.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- CARVALHO, Emanuel Jonathan Barbosa De. **DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA ELETROLÍTICA PARA ENSAIOS DE CORROSÃO EM MATERIAIS METÁLICOS**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Do Rio Grande do Norte Centro de Tecnologia, Natal, 2019.
- CHEN, Y.; CHEN, H. **A review of corrosion and corrosion protection of metals in seawater environment**. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018.
- DANILISZYN, Kaio Lincoln Keller. **Análise do potencial de repouso e taxa de corrosão em ácido sulfúrico 0,1 molar e ácido oxálico 0,1 molar em um aço AISI 1020 submetido a processo de encruamento**. 2013, Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2013.
- DUTRA, A. C., & NUNES, L. de P. (1999). **Proteção Catódica: Técnica de Combate à Corrosão**. Interciência.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

JUNIOR, Gilmar Ariel Lejambre. **DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA ELETROLÍTICA PARA ENSAIOS DE CORROSÃO**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Guarapuava, 2023.

KIREMIT, Sinan et al. Development of an In Situ Micro-Corrosion Cell for the Investigation of Pitting Corrosion on Austenitic and Ferritic Stainless Steels. **Corrosion and materials degradation**, [S. l.], n. 4, p. 104 –119, dez. 2023.

KOMARY, Mahyad et al. Low-Cost Technologies Used in Corrosion Monitoring. **Sensors**, Espanha, v. 23, p. 1309- 134, jan. 2023.

NETO, Antonio Dos Reis De Faria. **AVALIAÇÃO DE REJEITOS DE PAULLINIA CUPANA COMO INIBIDOR DE CORROSÃO EM AÇO CARBONO APLICANDO TÉCNICA GRAVIMÉTRICA E DE RUÍDO ELETROQUÍMICO**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal Do Amazonas, Manaus, 2017.

OVARFORT, R. New electrochemical cell for pitting corrosion testing. **Corrosion Scienc.** [S. l.], v. 28, n. 2, p. 135 –137, 1988.

PONTE, Haroldo de Araújo. **Fundamentos da corrosão**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, [S. l.: s. n.], 2003. Apostila da disciplina Eletroquímica Aplicada e Corrosão (TQ-417).

PROPEQ. **A Corrosão: Seus motivos e curiosidades!.** [S. l.]. 2022, Disponível em: <https://propeq.com/corrosao-curiosidades/>. Acesso em: 17/06/2026.

QUADROS, Gabriel Porto. **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE EXTRATOS VEGETAIS PARA APLICAÇÃO COMO INIBIDORES DE CORROSÃO**. 2019, Dissertação (Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

REMITA E. et al. A thin layer cell adapted for corrosion studies in confined aqueous environments. **Electrochimica Acta**, [S. l.], v. 52, n. 27, p. 7715 – 7723, 2007.

REVIE, R. Winston; UHLIG, Herbert H. **Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering**. 4^o ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

SOUSA, Jhonatan Peres de et al. Monitoramento da corrosão do aço de baixo carbono em sistema com fluxo turbulento de NaCl 3%: uma investigação eletroquímica. **Revista Matéria**, São Luís, v. 26, n. 3, p. 1517- 7076, fer. 2021.

VITALLER, Ana Vallejo; ANGST, Ueli M.; ELSENER, Bernhard. A setup for electrochemical corrosion testing at elevated temperature and pressure. **Measurement**, [S. l.], v. 155, apr. 2020.

WOLYNEC, Stephan. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2003.

ANEXO

```

#include <Gaussian.h>
#include <GaussianAverage.h>

/* ===== */
/*          DEFINIÇÕES          */
/* ===== */

// Pinos
#define PINO_TENSAO    A0
#define PINO_CORRENTE A1

// ----- Divisor de Tensão -----
#define RESISTOR_ALTO  30000.0    // 30kΩ
#define RESISTOR_BAIJO 7500.0     // 7.5kΩ
#define PROPORCAO_DIVISAO ((RESISTOR_ALTO + RESISTOR_BAIJO) /
RESISTOR_BAIJO)

// ----- ACS712 5A -----
#define SENSIBILIDADE 185.0    // mV/A
#define OFFSET        2500.0  // mV (meio da escala)
#define AJUSTE        0        // ajuste fino opcional

// Filtro média móvel (100 amostras)
GaussianAverage mediaCorrente(100);

/* ===== */
/*          SETUP          */
/* ===== */

void setup() {
    Serial.begin(9600);
}

/* ===== */
/*          LOOP          */
/* ===== */

void loop() {

    /* ===== LEITURA DA TENSÃO ===== */
    int leituraTensao = analogRead(PINO_TENSAO);
    float tensaoReal = (leituraTensao * 5.0 / 1023.0) *
PROPORCAO_DIVISAO;

    /* ===== LEITURA DA CORRENTE ===== */
    int leituraADC = analogRead(PINO_CORRENTE);

    mediaCorrente += leituraADC;
    mediaCorrente.process();

    float valorFiltrado = mediaCorrente.mean;

    // Converter ADC → mV
    float tensaoSensor = (valorFiltrado * 5000.0) / 1023.0;

    // Converter mV → mA

```

```

    float corrente_mA = ((tensaoSensor - OFFSET) / SENSIBILIDADE) *
1000.0;
    corrente_mA += AJUSTE;

    if (corrente_mA < 0) corrente_mA = 0;

    // Calibração experimental
    float correnteCalibrada = (0.0292 * corrente_mA - 14.904);

    /* ===== SAÍDA SERIAL ===== */
    Serial.println("=====");

    Serial.print("Tensao Real: ");
    Serial.print(tensaoReal, 4);
    Serial.println(" V");

    Serial.print("Corrente (mA): ");
    Serial.print(corrente_mA);
    Serial.println(" mA");

    Serial.print("Corrente Calibrada: ");
    Serial.print(correnteCalibrada);
    Serial.println(" mA");

    delay(2000);
}

```