

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GILMAR ARIEL LEJAMBRE JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA ELETROLÍTICA PARA ENSAIOS DE
CORROSÃO**

GUARAPUAVA

2023

GILMAR ARIEL LEJAMBRE JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA ELETROLÍTICA PARA ENSAIOS DE
CORROSÃO**

Development of an Electrolytic Cell for Corrosion Testing

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Henrique Holzmann

GUARAPUAVA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GILMAR ARIEL LEJAMBRE JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA ELETROLÍTICA PARA ENSAIOS DE
CORROSÃO**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 11 de dezembro de 2023.

Henrique Ajuz Holzmann
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

Aldo Przybysz
Doutor em Química dos Recursos Naturais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

Lucas Franco Wrege
Mestre em Química Aplicada
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

**GUARAPUAVA
2023**

Dedico este trabalho à minha família, por toda
dedicação, suporte e amor desde sempre.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, agradeço a Deus por guiar meus passos ao longo dessa jornada acadêmica e por me conceder força e sabedoria.

À minha família, minha base. Aos meus pais, Gilmar Ariel Lejambre e Marilda do Rocio Lejambre, e ao meu irmão Jullyan Danilo Tadeu Lejambre, por seu amor incondicional, apoio e incentivo incansável. Dedico uma lembrança especial à minha avó, Maria Miguel Mehl, em memória, cuja lembrança e carinho continuam a ser uma fonte de inspiração e vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Henrique Holzmann, expresso minha gratidão por sua orientação e dedicação ao longo deste projeto. Seu incentivo apoio e conhecimento foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha namorada, Caroline Sobolevski Pacheco, seu apoio, compreensão e presença nos momentos desafiadores foram um alento que me impulsionou.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo central a elaboração de uma célula de corrosão com sistema de controle de temperatura utilizando Arduino, e também o estudo dos diferentes tipos de corrosão. O desenvolvimento da célula permitirá a simulação de condições próximas à realidade encontrada na indústria, proporcionando um ambiente controlado para a análise dos efeitos corrosivos. Através do sistema de controle de temperatura, será possível variar a temperatura da célula de maneira controlada. O sistema com Arduino, plataforma de prototipagem eletrônica, será utilizado para o controle e monitoramento da temperatura, melhorando a precisão e segurança dos experimentos. Além da elaboração da célula de corrosão, foi abordado os diferentes aspectos da corrosão e alguns dos seus impactos para a economia. Esses estudos serão o embasamento teórico para compreender os mecanismos de corrosão e suas causas, possibilitando uma melhor interpretação dos resultados obtidos nos ensaios realizados pela célula. Assim espera-se contribuir para o avanço do conhecimento na área de corrosão e fornecer uma ferramenta útil para o desenvolvimento de novas pesquisas.

Palavras-chave: Corrosão; Célula de corrosão; Ambiente controlado.

ABSTRACT

This study aims to develop a corrosion cell with a temperature control system using Arduino and investigate different types of corrosion. The development of the corrosion cell will enable the simulation of conditions similar to those found in industry, providing a controlled environment for analyzing the corrosive effects. The temperature control system will allow precise temperature variations within the cell. The Arduino platform, an electronic prototyping platform, will be utilized for temperature control and monitoring, enhancing the accuracy and safety of the experiments. In addition to constructing the corrosion cell, various aspects of corrosion and its economic impacts were addressed. These studies will serve as a theoretical foundation for understanding corrosion mechanisms and causes, facilitating a better interpretation of the results obtained from the cell's tests. Thus, the goal is to contribute to the advancement of knowledge in the field of corrosion and provide a valuable tool for future research.

Keywords: Corrosion; Corrosion cell; Controlled environment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fenômeno corrosivo como processo inverso ao metalúrgico.	15
Figura 2 - Metal atuando como ânodo.	16
Figura 3 - Polarização anódica e catódica.	17
Figura 4 – Corrosão uniforme.	18
Figura 5 – Corrosão por placa em aço carbono	19
Figura 6 – Corrosão Alveolar em aço carbono.	20
Figura 7- Aumento da concentração de íons de cloreto.	21
Figura 8 - Corrosão intergranular.	21
Figura 9 – Modelo de controle de corrosão.	22
Figura 10 – Resistência relativa dos metais.	23
Figura 11- Célula Multifacetada.	27
Figura 12- Copo de <i>Nylon</i>	29
Figura 13 - Propriedades físicas e mecânicas do <i>Nylon</i>	30
Figura 14 – Desenho técnico suporte de vidro.	31
Figura 15 – Arduino com sensor de temperatura.	31
Figura 16 – Arduino com entradas e visor.	32
Figura 17-Modelo inicial proposto.	32
Figura 18 – a) Resistência para aquecimento, b) Controlador de temperatura do sistema.	33
Figura 19- a) Especificações do controlador de temperatura, b) Sensor de temperatura DS18B20.	33
Figura 20- Copo <i>Nylon</i>	34
Figura 21- Suporte fabricação 3D.	35
Figura 22- Conjunto concluído.	35
Figura 23- Célula Standard.	36
Figura 24- Célula PTFE cell.	37
Figura 25- Célula de corrosão plana.	37
Figura 26- Célula de ensaio tipo Sucker.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Revestimentos mais comuns	24
--	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DDP	Diferença De Potencial
PIB	Produto Interno Bruto
pH	Potencial Hidrogeniônico
UTFPR-GP	Universidade tecnológica federal do Paraná campus Guarapuava

LISTA DE SIMBOLOS

Ag	Prata
AgCl	Cloreto de prata
Fe	Ferro
Ni	Níquel
Al	Alumínio
Cu	Cobre
Ti	Titânio
A	Ampere
W	Watt
°C	Grau Celcius
g/cm ³	Gramas por centímetro cubico
W/°K.m	Watt por graus Kevin metro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral	13
1.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Corrosão aspectos gerais	15
2.2	Potencial de eletrodo	16
2.3	Polarização	17
2.4	Formas de corrosão	18
2.4.1	Uniforme.....	18
2.4.2	Placas.....	19
2.4.3	Alveolar	19
2.4.4	Puntiforme ou por pite	20
2.4.5	Intergranular	21
2.5	Métodos de combate a corrosão	21
2.5.1	Influência do Design	22
2.5.2	Influência da seleção de materiais	23
2.5.3	Influência de inibidores.....	23
2.5.4	Influência de revestimentos.....	24
2.6	Impactos econômicos	25
2.7	Célula de corrosão	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4	RESULTADOS	29
4.1	Proposta inicial	29
4.2	Proposta desenvolvida	32
4.3	COMPARATIVO DE PREÇOS	36
5	CONCLUSÕES	38
6	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

De uma maneira muito disseminada e amplamente aceita, pode-se nomear a corrosão como o desgaste de um material, normalmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, associada ou não a esforços mecânicos. A deterioração acarretada pela interação físico-química entre o material e o seu meio configura alterações prejudiciais e indesejáveis ao material, como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o impróprio para a finalidade proposta (GENTIL,2022).

Os três fatores principais para mensurar a gravidade da corrosão são: economia, segurança e conservação. Com a ideia de minimizar o impacto econômico, engenheiros e cientistas da área de corrosão trabalham em conjunto para reduzir as perdas de material causadas pela corrosão em sistemas como tubulações, tanques, componentes metálicos de maquinaria, embarcações, pontes, e estruturas marítimas, entre outros. A corrosão pode comprometer a segurança de equipamentos em operação, potencialmente causando falhas em itens como vasos de pressão, caldeiras, recipientes para substâncias químicas perigosas, pás de turbina, pontes, componentes de aeronaves e sistemas automotivos. O fator segurança é de extrema relevância no desenvolvimento de equipamentos e projetos para usinas nucleares e no tratamento de resíduos nucleares. Além disso, a perda de metal devido à corrosão acarreta um desperdício não apenas de material, mas também dos recursos energéticos, hídricos e de mão de obra humana investidos na fabricação das estruturas metálicas. Vale ressaltar que a restauração de equipamentos corroídos demanda investimentos adicionais desses recursos essenciais, incluindo metal, energia, água e mão de obra (UHLIG,1958).

Problemas de corrosão são frequentes na indústria, e ocorrem nas mais diversas áreas de produção. Sistemas com trocadores de calor e caldeiras, equipamentos marítimos, estruturas metálicas, na medicina em equipamentos da linha ortopédica além de sistemas de telecomunicação, que sofrem com corrosão em suas linhas. Estas instalações representam investimentos vultosos, exigindo durabilidade e resistência, justificando os valores investidos e evitando acidentes (GENTIL,2022).

Cerca de 30% da produção mundial de ferro e aço é desperdiçada com problemas relacionados a corrosão e oxidação, sendo que esse custo representa em

média 1 a 5% do PIB de seus países. Em 2019 o Brasil apresentou um gasto equivalente a 4% de seu PIB (R\$290 bilhões) com manutenção de problemas relacionados a corrosão (NEXA RESOURCES, 2019).

As perdas econômicas decorrentes da corrosão e que atingem as atividades industriais, podem ser classificadas em diretas e indiretas. São perdas diretas, os custos de substituição das peças ou equipamentos que sofreram desgaste, incluindo-se energia e mão de obra; os custos da manutenção dos processos de proteção (proteção catódica, revestimentos metálicos e não metálicos, pinturas etc.) (GENTIL,2022).

As perdas indiretas são mais difíceis de se avaliar, mas uma breve análise das perdas conduz à conclusão de que podem totalizar custos mais significativos que as perdas diretas e nem sempre podem ser quantificados. São perdas indiretas: paralizações acidentais, perda de produtos como de óleo, soluções, gás ou água através de tubulações corroídas ou durante a realização do reparo (GENTIL,2022).

Pela abrangência dos processos de corrosão e seus prejuízos provocados ao setor industrial e de modo geral a sociedade, fica evidenciada a necessidade de desenvolvimentos de estudos que ajudem a combater esse fenômeno. Os processos de ensaios em laboratório são a melhor e mais adequada maneira para se atingir resultados com alta precisão e de maneira padronizada. Assim, é possível obter o resultado de como dado material será degradado pela ação do tempo em um período mais curto.

Com base nesse contexto, o presente trabalho tem como finalidade, desenvolver uma célula de corrosão, que possibilite o aquecimento e resfriamento de maneira controlada dentro do processo de corrosão, permitindo assim resultados mais confiáveis e com maior controle do processo.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho visa desenvolver uma célula para ensaio de corrosão, onde seja possível o controle de temperatura do meio frente a realidade encontrada na indústria.

1.2 Objetivos Específicos

- Propor e modelar uma célula de corrosão;

- Fabricação da célula de corrosão;
- Desenvolvimento do sistema de aquecimento por banho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

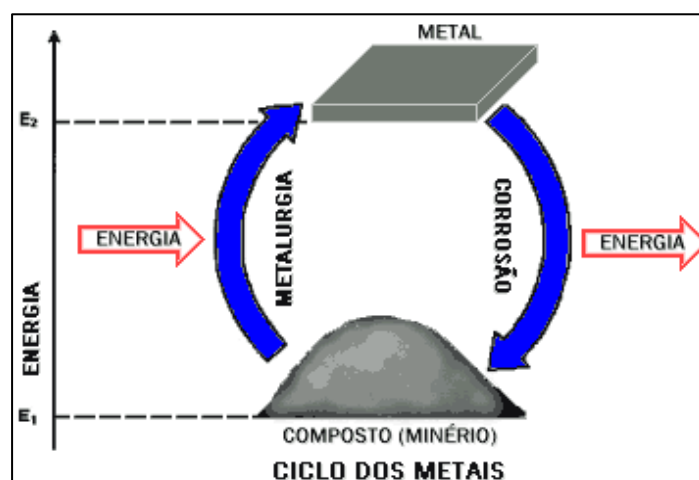
2.1 Corrosão aspectos gerais

A corrosão em geral é um processo espontâneo que ocorre nos mais diversos componentes, e se não fosse o emprego de mecanismos protetores ocorreria a completa falha dos materiais metálicos. Os processos de corrosão são reações químicas e eletroquímicas que se passam na superfície do metal e obedecem a princípios de corrosão bem estabelecidos (GENTIL,2022).

A corrosão é um processo natural e comum que ocorre na superfície dos materiais quando expostos a ambientes agressivos. Os metais estão sujeitos a esse tipo de desgaste, caso sejam expostos a condições desfavoráveis, o que pode comprometer sua durabilidade e desempenho, tornando-os incapazes de atender às suas finalidades específicas.

Se avaliada a ação do meio corrosivo sobre o material, pode-se classificar o processo corrosivo em duas frentes, corrosão eletroquímica e corrosão química. A corrosão eletroquímica é a mais comum na natureza e suas características são: ocorrer na presença de água no estado líquido, a temperatura deve ser abaixo do ponto de orvalho da água (normalmente em temperatura ambiente) e também ocorre a formação de uma pilha ou célula de corrosão, com circulação de elétrons na superfície. Em virtude de o eletrólito necessariamente conter água, essa reação também pode ser denominada corrosão em meio aquoso.

Figura 1 - Fenômeno corrosivo como processo inverso ao metalúrgico.



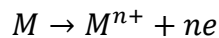
Fonte: Dutra e Nunes (1999).

Na ocorrência de corrosão, os metais interagem com elementos não metálicos presentes no ambiente, tais como Oxigênio, Enxofre, Sulfeto de Hidrogênio e Dióxido de Carbono, entre outras, gerando compostos similares aos encontrados naturalmente, dos quais foram originalmente extraídos. Logo, é possível concluir que o processo corrosivo representa uma inversão do processo metalúrgico, Figura 1.

2.2 Potencial de eletrodo

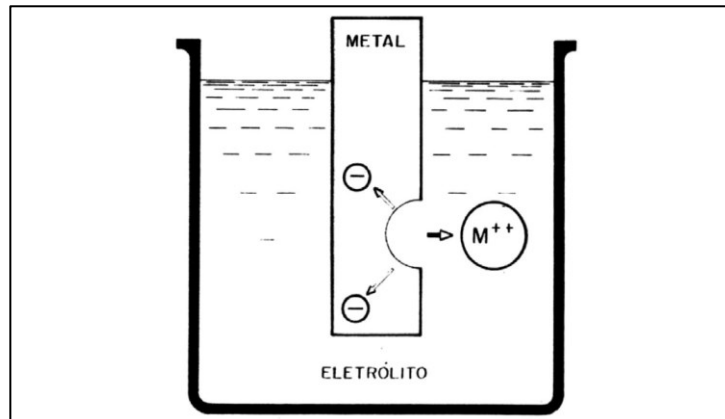
Quando ocorre o contato entre um metal e um eletrólito, forma-se uma diferença de potencial elétrico (DDP), entre eles. A diferença de potencial pode apresentar valores positivos, negativos ou mesmo nulos, dependendo dos parâmetros assumidos, esse fenômeno está ligado ao funcionamento das pilhas eletroquímicas ou das pilhas de corrosão.

Assim, o comportamento de diversos pares de eletrodos apresenta distintas DDP ou voltagens, e essa pode ser considerada como a força eletromotriz para a ocorrência de reações eletroquímicas, Figura 2.



Equação 1

Figura 2 - Metal atuando como ânodo.



Fonte: Dutra e Nunes (1999).

De acordo com Gentil (2022), é necessário um valor de referência ou um padrão para determinar a medida da voltagem. Uma maneira de mensurar o potencial de um eletrodo é conectá-lo a um voltímetro, usando um segundo eletrodo como referência. Assim, é possível obter experimentalmente os valores de potencial. O eletrodo padrão é o de hidrogênio, porém o mais utilizado como referência é o de prata-cloreto de prata Ag/AgCl.

2.3 Polarização

O estudo da polarização desempenha um papel crucial na análise da corrosão eletroquímica. É um princípio fundamental que possibilita a obtenção de dados essenciais, como potencial, corrente e densidade de corrente, em células de eletrólise. Para isso, utiliza-se um dispositivo chamado potênciostato.

Quando uma DDP é aplicada a um eletrodo, causando uma mudança em seu potencial, observa-se o fenômeno denominado sobre potencial ou polarização. A polarização pode ser expressa pela Equação 2, a qual calcula a diferença entre o potencial de equilíbrio do eletrodo e o novo potencial induzido pela fonte externa na célula eletroquímica. Mittelstadt (1993) afirma que ao imergir um metal em uma solução eletroquímica, ocorre o estabelecimento de uma diferença de potencial (DDP) entre o eletrólito e o corpo metálico. Essa diferença de potencial é obtida mediante a aplicação de corrente utilizando um potênciostato.

$$\eta = E' - E$$

Equação 02

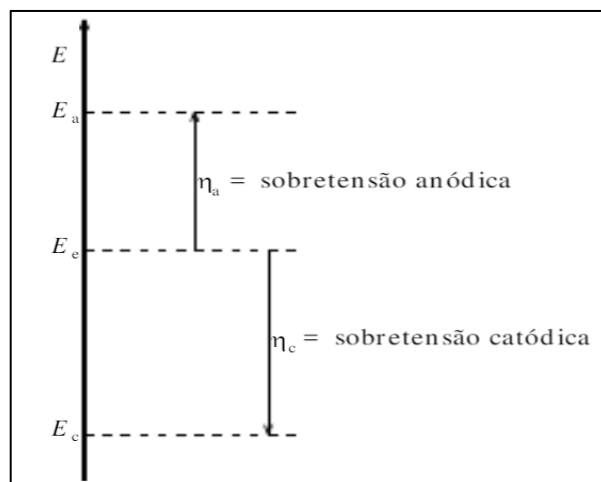
Onde:

η – Diferença de potencial (DDP) [V];

E – Potencial após excitação por fonte externa [V];

E' – Potencial de estabilidade do eletrodo [V].

Figura 3 - Polarização anódica e catódica.



Fonte: Woly nec (2003).

2.4 Formas de corrosão

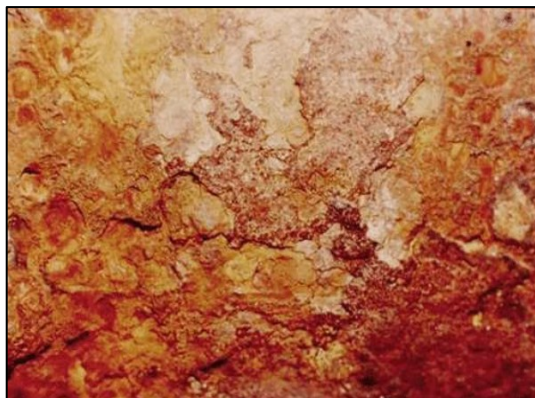
Existem diferentes formas de classificar a corrosão com base na morfologia. A corrosão é um mecanismo complexo que pode ocorrer em diferentes formas, e o conhecimento dessas formas é fundamental para o estudo dos processos corrosivos. Os diferentes processos de corrosão podem ser classificados de acordo com sua aparência ou forma de ataque, assim como suas causas e mecanismos (GENTIL, 2022).

Essa classificação permite uma identificação mais precisa do processo corrosivo em curso e facilita a escolha do método mais adequado para prevenção. Entre as diversas categorias, destacam-se; uniforme, por placas, alveolar, puntiforme e intergranular, que serão abordadas.

2.4.1 Uniforme

Uma das formas mais predominantes de corrosão, a uniforme, ocorre principalmente em materiais homogêneos como o aço carbono. Ocorre em toda a superfície do metal de maneira uniforme, de modo que a perda de massa metálica é a mesma em qualquer ponto, conforme Tolentino (2015), conforme Figura 4. Resultando em uma perda de espessura uniforme. Essa forma de corrosão é frequentemente observada em metais, especialmente aqueles que não desenvolvem película protetora como resultado do processo corrosivo.

Figura 4 – Corrosão uniforme.



Fonte: Gentil (1996).

"Em certas circunstâncias inevitáveis, pode ser encarada como a corrosão mais favorável à avaliação da vida útil de estruturas ou máquinas, uma vez que

permite previsão mais precisa do que ocorre, em comparação com as formas localizadas de corrosão (VERNON, 1957).

2.4.2 Placas

A corrosão não ocorre em toda a superfície e sim forma placas em determinadas regiões do metal, Tolentino (2015), como mostrado na Figura 5, em vez de se espalhar por toda a extensão. Esse tipo de corrosão é comumente observado em materiais que possuem uma camada protetora inicialmente. Ao longo do tempo, a espessura dessa camada protetora aumenta significativamente, levando ao seu desprendimento. Como resultado, o material fica vulnerável a novos processos corrosivos.

Figura 5 – Corrosão por placa em aço carbono

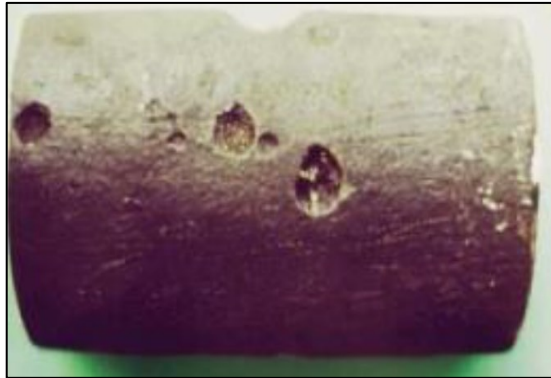


Fonte: Gentil (1996).

2.4.3 Alveolar

Recebe esse nome por formar estruturas semelhantes a alvéolos, Tolentino (2015) cita que este é um fenômeno que ocorre de forma específica, geralmente com profundidade menor ao seu diâmetro, como mostrado na Figura 6. É chamada assim devido à sua semelhança com alvéolos, apresentando um fundo arredondado sendo frequentemente encontrado em materiais que possuem uma camada protetora.

Figura 6 – Corrosão Alveolar em aço carbono.



Fonte: Gentil (1996).

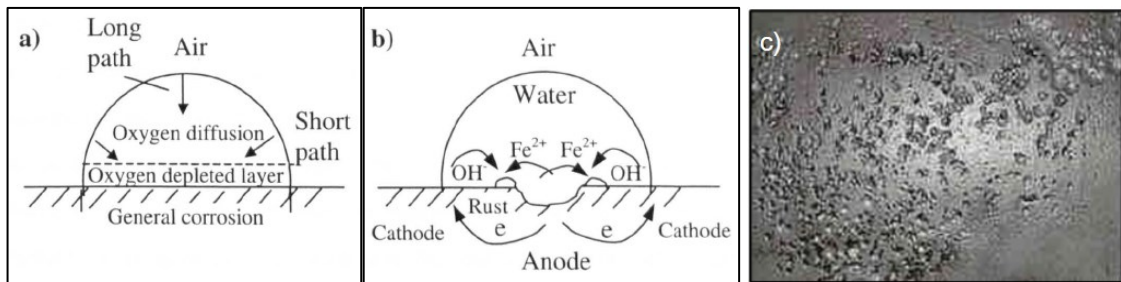
2.4.4 Puntiforme ou por pite

A corrosão puntiforme ocorre em vários pontos ao longo do material, diferentemente da alveolar. Nessa categoria de corrosão, a profundidade é maior do que o diâmetro, e apresenta um fundo angulado em vez de arredondado, como demonstrado na Figura 7. É a forma de corrosão mais destruidora e difícil de detectar por causa do seu pequeno tamanho. Pode causar perfurações no metal. Forma-se em determinadas regiões da superfície, como pontos de grande profundidade (TOLENTINO, 2015).

Ao analisar estruturas com sinais de corrosão por pites, são considerados parâmetros como a quantidade de pites por área, a profundidade dos pites e o diâmetro.

Em certas circunstâncias, a corrosão conhecida como "*pitting*" pode ocorrer devido a flutuações na concentração de oxigênio nas proximidades da área afetada. Esse processo corrosivo ocorre sob a presença de gotículas de água e é caracterizado pela redução da quantidade de oxigênio no centro dessas gotículas, como ilustrado nas Figuras 7a e 7b. Nessa situação, a região central se torna anódica em relação às áreas circulares, que assumem uma função catódica. Como resultado, pode-se observar o aparecimento de produtos de corrosão próximo à depressão, criando uma camada de proteção que isola a área afetada do ambiente circundante. Esse processo auto-sustentável é motivado pelo aumento da concentração de íons de cloreto na região da depressão (VERNON, 1957).

Figura 7- Aumento da concentração de íons de cloreto.

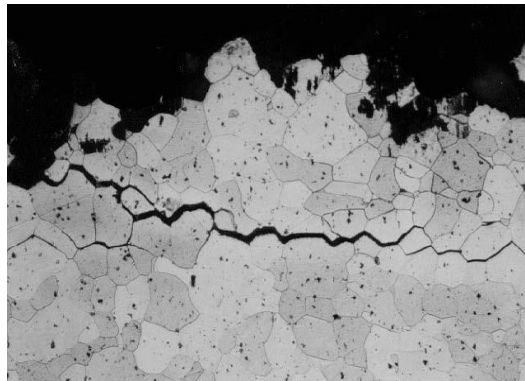


Fonte: Vernon (1957) e Gentil (1996).

2.4.5 Intergranular

A corrosão intergranular ocorre nos contornos de grãos, predominantemente em aços inoxidáveis, sendo um fenômeno corrosivo que afeta em níveis microscópicos, conforme Figura 8. Esse tipo de corrosão compromete diretamente as propriedades mecânicas do material, podendo até levar à falha por fratura.

Figura 8 - Corrosão intergranular.



Fonte: Haleck (2018).

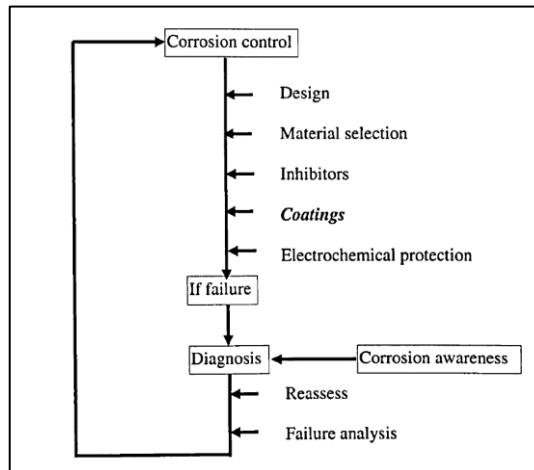
Um fator de influência significativo para a ocorrência desse tipo de corrosão é a presença de impurezas nas ligas metálicas que aumentam a concentração de um dos metais da liga (TOLENTINO, 2015). Essa forma de corrosão é mais comum em elementos como o alumínio e aços inoxidáveis, devido ao empobrecimento de cromo nos contornos dos grãos.

2.5 Métodos de combate a corrosão

A corrosão pode afetar a maioria dos metais, a menos que seja impedida por medidas de prevenção. Estas medidas englobam o design apropriado da estrutura metálica, a seleção de materiais resistentes ao processo corrosivo, o controle do

ambiente onde o metal se encontra, os revestimentos protetores e o uso de métodos eletroquímicos. Além desses aspectos, testes de corrosão e monitoramento periódicos são essenciais para identificar princípios de corrosão.

Figura 9 – Modelo de controle de corrosão.



Fonte: Ashworth (1987).

O modelo de controle de corrosão proposto por Ashworth (1987), mostrado na Figura 9, representa um conjunto específico de ações e processos para a prevenção da corrosão, que podem abranger elementos relacionados à seleção de materiais, técnicas de revestimento, monitoramento e inspeção.

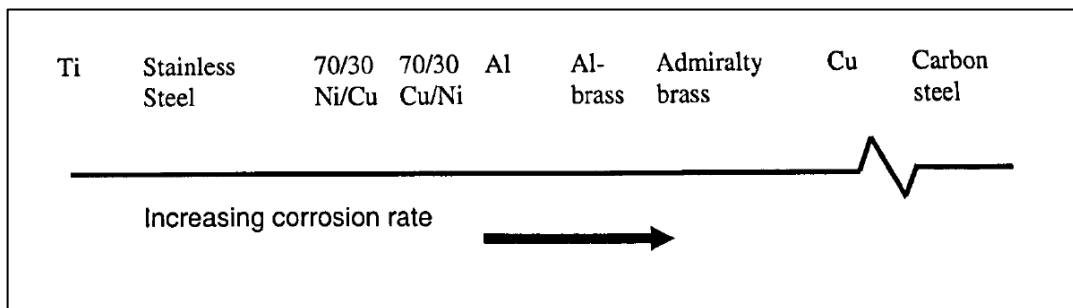
2.5.1 Influência do Design

Um bom projeto desempenha um papel fundamental na utilização bem-sucedida de materiais em ambientes corrosivos, por outro lado um design deficiente pode colocar até mesmo materiais com boas propriedades em risco de corrosão. Evitar configurações geométricas que facilitem a corrosão é essencial, como a falta de drenagem e ventilação adequadas, a presença de fendas ou locais propensos à formação de depósitos, curvas acentuadas, irregularidades, saliências e rugosidades que podem levar à erosão-corrosão, além de projetos inacessíveis para manutenção preventiva e combinações de dois metais diferentes na série galvânica, que podem resultar em corrosão bimetálica. É igualmente fundamental considerar o ambiente de trabalho desde o início do processo de projeto, incluindo fatores como umidade relativa, temperatura, pH, concentração de oxigênio, presença de poluentes dissolvidos, velocidade e outros parâmetros que podem afetar a corrosão (VERNON, 1957).

2.5.2 Influência da seleção de materiais

A seleção do material desempenha um importante papel no exercício de controle de corrosão durante o processo de projeto. Embora a escolha do material mais resistente à corrosão para um ambiente específico seja um objetivo central, outros requisitos conflitantes, como propriedades mecânicas, aspecto estético, facilidade de fabricação, disponibilidade do material e custo geral, também desempenham um papel crítico na decisão. Para exemplificar a influência do ambiente no comportamento de corrosão dos materiais, a figura 11 fornece uma representação das resistências relativas dos metais à corrosão geral da superfície em água do mar de baixa velocidade e temperatura ambiente. Vale ressaltar que a quebra de escala significativa entre o cobre e o aço carbono reflete um aumento relativamente substancial na taxa de corrosão (VERNON,1957).

Figura 10 – Resistência relativa dos metais.



Fonte: Vernon (1957).

No entanto, situações diferentes se aplicam a formas localizadas de corrosão, inclusive com alguns dos materiais mais resistentes à corrosão listados acima, o que torna a seleção de material um trabalho não fácil.

2.5.3 Influência de inibidores

O uso de compostos inorgânicos ou orgânicos como inibidores de corrosão é bastante comum. Os inibidores inorgânicos geralmente são divididos em compostos oxidantes e não oxidantes. Esses inibidores geralmente produzem uma diminuição significativa na corrosão do metal, afetando os processos ânodos ou catódicos. Os inibidores ânodos aumentam a polarização do ânodo reagindo com os íons dos metais corroídos para produzir filmes passivos finos ou camadas de sal que revestem o

ânodo. Esses inibidores ânodos, usados principalmente em aço, incluem hidróxidos solúveis, fosfatos, polifosfatos, nitritos, silicatos e carbonatos. (GREATHOUSE E WESSEL, 1954). Inibidores catódicos afetam as reações catódicas de redução de oxigênio e geração de hidrogênio. (TRETHERWEY E CHAMBERLAIN, 1995).

Além da reação catódica de redução de oxigênio, um tipo de inibidor reage com o íon hidroxila para precipitar compostos insolúveis no local do cátodo, cobrindo assim o cátodo do eletrólito e restringindo o acesso do oxigênio ao local. Sais de magnésio, zinco ou níquel servem como inibidores catódicos para ferro e aço em condições de imersão parcial (GREATHOUSE E WESSEL, 1954). No entanto, deve ser notado que o uso bem-sucedido de inibidores frequentemente requer um conhecimento significativo de seu funcionamento e uma compreensão completa do processo de corrosão.

2.5.4 Influência de revestimentos

Revestimentos protetores têm sido utilizados como ferramenta de prevenção à corrosão desde tempos antigos. Um revestimento aplicado a um metal para evitar a corrosão pode oferecer uma forma de proteção de sacrifício, atuar como um inibidor ou simplesmente excluir o ambiente corrosivo. Para este último, o revestimento deve ser impermeável ao eletrólito corrosivo, resistente a danos mecânicos subsequentes, etc. (VERNON, 1957). Os revestimentos mais comuns podem ser categorizados como indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Revestimentos mais comuns.

Revestimento Metálico	Revestimentos inorgânicos	Revestimentos orgânicos
Eletrodeposição	Anodização	Tintas convencionais
Imersão a quente	Fosfotização	Revestimento Epoxy
Revestimento	Cementação	Betume
Difusão	Tratamento térmico	Borracha clorada
Liga a laser		Revestimento plástico
Tratamento térmico		

Fonte: Traduzido de Vernon (1957).

2.6 Impactos econômicos

Os custos causados por corrosão são extremamente relevantes para análise e tomada de decisão, seja na concepção de projetos ou em situações diárias de manutenção. O uso de métodos anticorrosivos geralmente são os mais eficazes e economicamente viáveis (GENTIL,2022).

As perdas econômicas podem ser divididas em dois focos principais: perdas diretas e perdas indiretas. As perdas diretas são os custos associados à substituição de estruturas e máquinas corroídas, incluindo componentes como tubos de condensador, silenciadores, dutos e coberturas metálicas, juntamente com os gastos com mão de obra necessários. Além disso, exemplos de perdas diretas incluem a necessidade de repintar estruturas para prevenir a corrosão e os custos de implementação e manutenção de sistemas de proteção catódica para dutos subterrâneos. Portanto, é fundamental ponderar estratégias para mitigar essas perdas diretas, tanto na seleção de materiais apropriados quanto na implementação de medidas de proteção contra a corrosão, o que pode resultar em economias significativas e na preservação de recursos a longo prazo.

O aspecto financeiro representa um fator de suma importância para muitas das investigações atuais relacionadas à corrosão. Os prejuízos enfrentados tanto pela indústria como pelos órgãos governamentais são significativos, totalizando bilhões de dólares anualmente. De acordo com Georgeus (2002), os Estados Unidos acumulam perdas da ordem de 276 bilhões de dólares anualmente, o equivalente a cerca de 3,1% do Produto Interno Bruto (PIB) do país. Aproximadamente 25 a 30% dessas perdas poderiam ser evitadas com a aplicação eficiente de metodologias de prevenção à corrosão (GEORGEUS, 2002). Estudos sobre o impacto financeiro da corrosão também foram realizados em nações como Austrália, Grã-Bretanha, Japão e outros. Em cada um desses países avaliados, os custos referentes à corrosão representam aproximadamente 3 a 4% do Produto Nacional Bruto (KUGER, 2000).

A avaliação das perdas indiretas apresenta um desafio maior, porém, exemplos típicos dessas perdas revelam que elas contribuem significativamente para o aumento dos prejuízos, além das perdas diretas mencionadas anteriormente. Alguns exemplos de perdas indiretas:

1. Perdas por paralização: quando os componentes mecânicos atingem um nível alto de desgaste por corrosão eles podem perder suas propriedades ou até mesmo deixar de executar sua função primária, causando, a paralização de unidades fabris

2. Perda de produção: quando há quebras mecânicas inesperadas devido a corrosão (UHLIG,1958).

3. Perda de eficiência: quando um componente mecânico começa a se degradar podendo perder suas propriedades. Os processos de corrosão podem impor limites às eficiências dos sistemas, representando perdas monetárias de grande impacto. (UHLIG,1958).

4. Contaminação de produtos: devido ao desgaste de componentes, podem ocorrer a contaminação de produtos em gerais por metais (UHLIG,1958).

2.7 Célula de corrosão

A célula de corrosão é um instrumento fundamental nos estudos sobre corrosão em materiais metálicos. Ela possibilita a simulação controlada de ambientes corrosivos e a avaliação da resistência à corrosão de diversas ligas metálicas. Existem diversos tipos de células de corrosão, como células de eletrodos dissimilares, que envolvem a interação de metais distintos, como abordado por Pourbaix (1974).

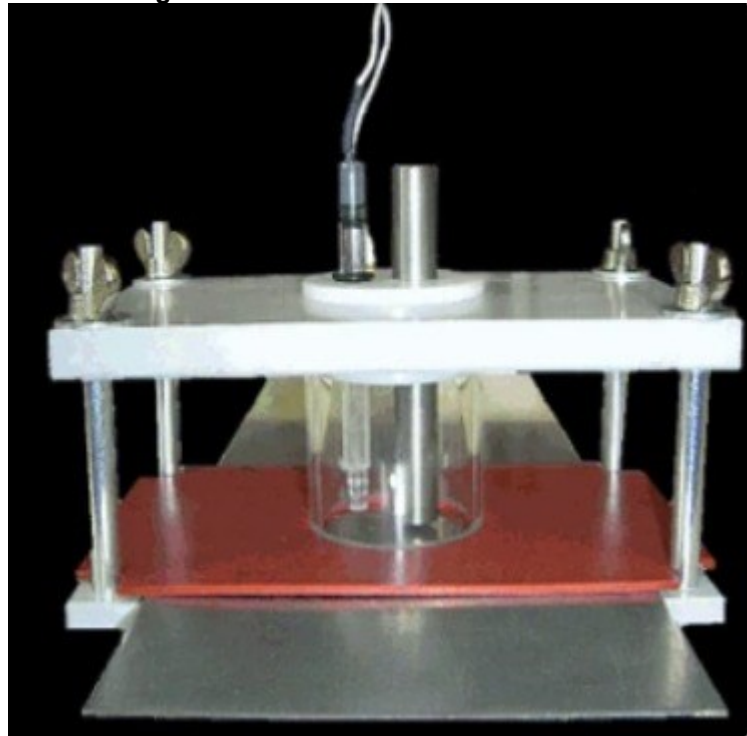
Essas células podem incluir casos como a célula seca, onde ocorre uma separação de fases entre o metal e impurezas condutoras na superfície, ou um tubo de cobre conectado a um tubo de ferro, onde a dissimilaridade entre os metais propicia reações corrosivas (MANSFELD, 2005).

As células de corrosão são utilizadas para entender os mecanismos e fatores que influenciam no processo corrosivo, além de avaliar a eficácia de técnicas de proteção e mitigação. Diversas formas de análise podem ser utilizadas em células de corrosão, como medida de perda de massa, análise de produtos de corrosão e polarização (SASTRI,2011).

A construção de células de corrosão é essencial para o entendimento e desenvolvimento de estratégias de prevenção e controle da corrosão em diferentes aplicações na indústria.

Um modelo difundido no meio científico é a célula de corrosão multifacetadas com controle de temperatura. Essas células são utilizadas em vários ramos, como teste de corrosão, pesquisas eletroquímicas, metalografia, teste de garantia de qualidade, biotecnologia e microeletrônica. A célula KMZ3 da empresa Zahner Scientific Instruments suporte de amostra (WE), contra-eletrodo, eletrdo de referência (Calomel), tubo de junção de líquido, vaso intermediário, entrada e saída de gás. A KMZ5 possui recursos adicionais, como eletrdo de referência (Ag / AgCl), termômetro e agitador de vidro.

Figura 11- Célula Multifacetada



Fonte: LabSolutions (2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi realizada uma pesquisa dos produtos similares disponíveis no mercado, esta atividade foi desenvolvida a fim de se levantar os principais tipos de células de corrosão disponíveis no mercado. Estes sistemas foram comparados, confrontando suas características e peculiaridades, realizando um Benchmarking.

Na sequência foi proposto um projeto inicial para construção da célula de corrosão com controle de temperatura, este modelo foi baseado nas soluções encontradas através do Benchmarking. A seleção dos elementos que compõem este sistema levou em conta o custo-benefício, a simplicidade, baixo custo de manutenção e facilidade de fornecimento de peças.

Com a seleção dos elementos definida, os componentes foram detalhados e descrito, com apoio de Software CAD (Computer Aided Design) realizou-se a modelagem do sistema.

Na etapa posterior, desenvolveu-se a construção do protótipo. Possíveis alterações em material, geometria e outras características foram propostas e executadas baseando-se em itens disponíveis no mercado, levando em consideração a facilidade de acesso e o custo.

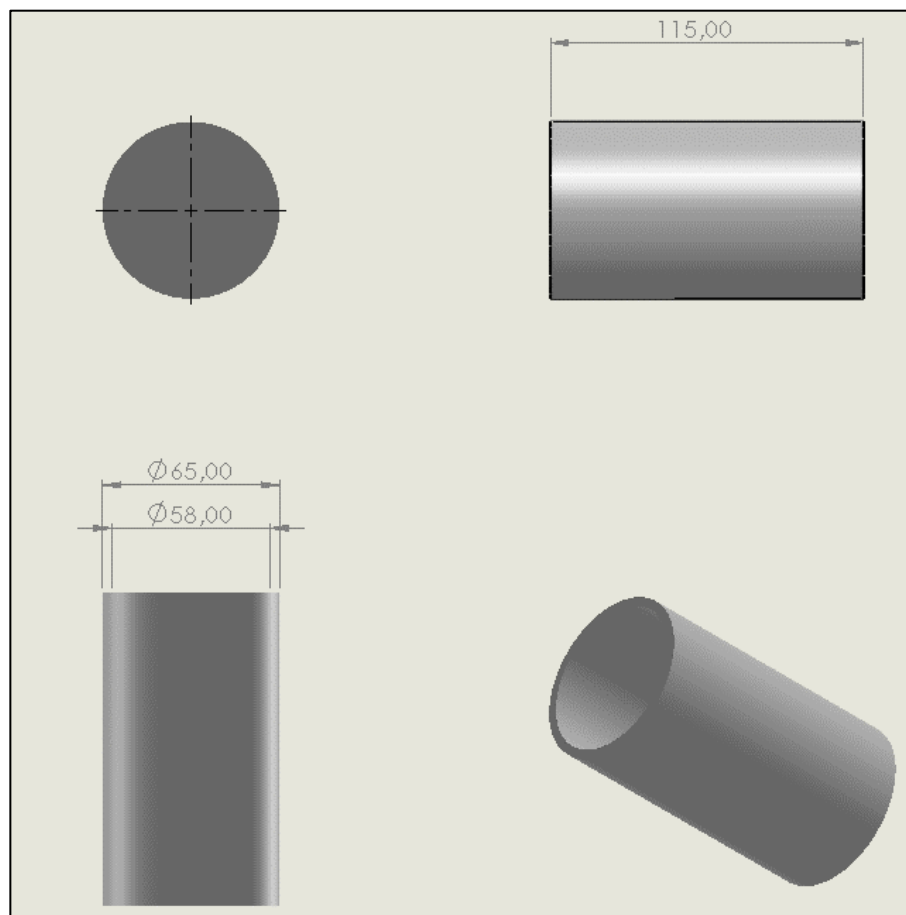
Com o protótipo construído levantou-se os custos totais do projeto, realizando uma comparação com os itens disponíveis no mercado, discutindo-se as vantagens do protótipo desenvolvido.

4 RESULTADOS

4.1 Proposta inicial

O objetivo foi criar um ambiente controlado, onde fosse possível aquecer o sistema, proporcionando uma reação mais estável e sendo possível simular diferentes condições. Para o desenvolvimento do projeto, foi utilizado o *software* SolidWorks, onde foram modelados os componentes, individualmente e em conjunto. A célula foi dimensionada de maneira compacta, propiciando um maior controle dos ensaios de corrosão, e com menor consumo de insumos.

Figura 12- Copo de Nylon.



Fonte: Autoria própria (2023).

Um dos critérios essenciais na seleção do material para a célula é a baixa capacidade de reação, garantindo que o mesmo seja inerte e não sofra interações químicas com os meios utilizados nos ensaios. Além disso, é necessário que o material apresente boa resistência às alterações de temperatura, uma vez que a célula passará por variações térmicas significativas ao longo do processo. Por se tratar de

um equipamento de dimensões reduzidas, é desejável que este seja de fácil manuseio e montagem, tornando o processo ágil.

Levando em consideração os aspectos desejados, propôs-se um sistema de troca de calor indireto do tipo “Banho Maria”, onde a amostra fica disposta num receptáculo de *Nylon* Figura 11 e mergulhado em água, na qual sua temperatura é controlada através de um sistema automatizado.

A escolha do *Nylon* atende as necessidades do projeto, pois o mesmo é um termoplástico semi-cristalino com baixa densidade e alta estabilidade térmica, $1,14\text{g/cm}^3$ e $0,23\text{W/}^\circ\text{K.m}$ respectivamente o que o torna adequado a aplicação. O modelo selecionado foi o *Nylon 6.0*, sendo o mesmo um polímero termoplástico derivado da poliamida 6, amplamente aplicado em diferentes setores da indústria, suas propriedades são mostradas na Figura 12.

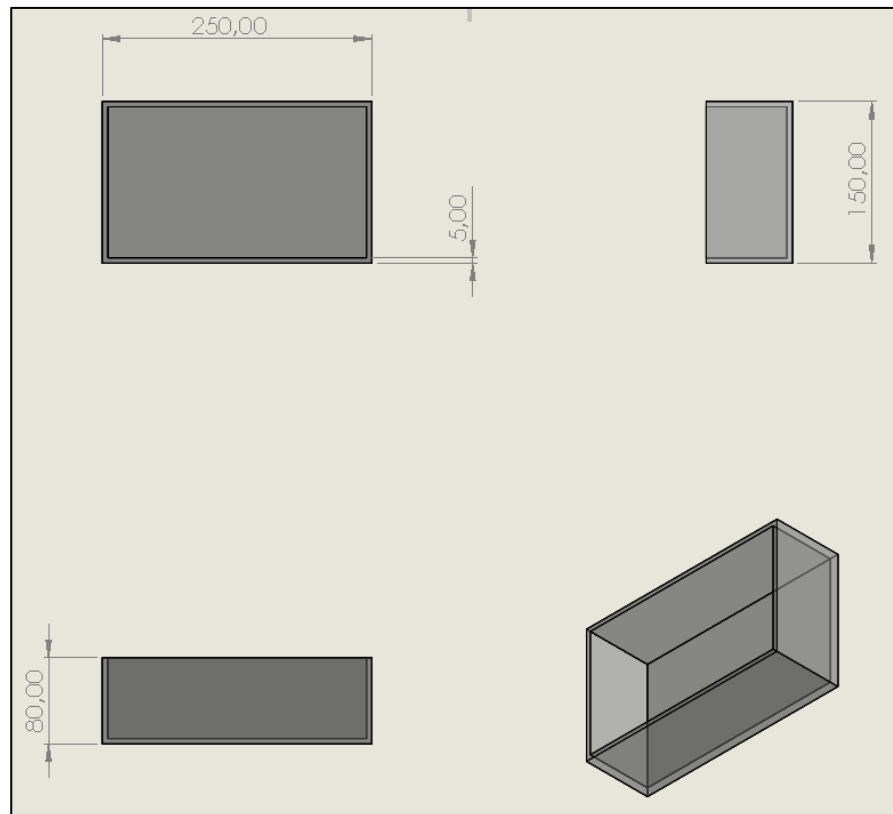
Figura 13 - Propriedades físicas e mecânicas do *Nylon*.

Propriedades físicas	Nylon 6.0	Propriedades térmicas	Nylon 6.0
Peso específico	1,14 g/cm ³	Calor específico a 23°C	1,7 J/°K.g
Temperatura mínima e máxima em uso contínuo	-40°C/ +100°C	Condutividade térmica	0,23 W/°K.m
Absorção de umidade até equilíbrio a 23°C (c/UR 50%)	3,0%	Coefficiente linear de expansão térmica a 23°C	90 (70) 10-6/°K
Absorção de água até saturação	9,0%	Temperatura máxima de uso em curto período	150°C
Propriedades mecânicas	Nylon 6.0	Ponto de fusão	220°C
Tensão de escoamento à tração	80 (60) MPa	Temperatura de transição vítrea	40 (5) °c
Tensão de ruptura à compressão	90 MPa	inflamabilidade	HB
Tensão de ruptura à flexão	----	Propriedades elétricas	Nylon 6.0
Módulo de elasticidade à tração	3000 (1800) MPa	Constante dielétrica a 1000 Hz	3,8
Módulo de elasticidade à compressão	1700 MPa	Fator de perda dielétrica a 10 Hz	0,03 (0,3)
Módulo de elasticidade à flexão	2400 (850) MPa	Resistividade volumétrica a 23°C 50% RH	10^{12} (10^{15}) Ωcm
Elongação até a ruptura	60 (200) %	Rigidez dielétrica	30 (80) KV/mm
Resistência ao impacto	n.q n.r n.b	Resistência superficial	10^{13} Ω
Dureza Rockwell	R100	Propriedades químicas	Nylon 6.0
Resistência à penetração de esfera	160 (80) MPa	Resistência a ácidos fortes	Não resiste
Tensão de fluência c/1% defor. em 1000H	5 MPa	Resistência a ácidos fracos	Resistência limitada
Coefficiente de atrito p/ aço refitic. E polid. c/ resina a seco	0,42 (0,38)	Resistência à bases forte	Resistente
		Resistência à bases fracas	Resistente
		Resistência a raios solares	Não resiste

Fonte: Portal Virtuhub UFSC (2023).

O material selecionado como recipiente para o “Banho Maria” foi o vidro temperado, com resistência a água ebulição e a variação de temperatura. As dimensões iniciais de projeto foram 250 x 150 x 80mm, conforme Figura 13.

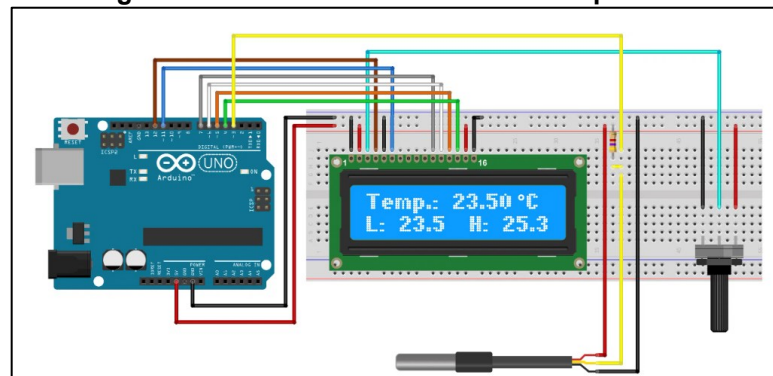
Figura 14 – Desenho técnico suporte de vidro.



Fonte: autoria própria (2023).

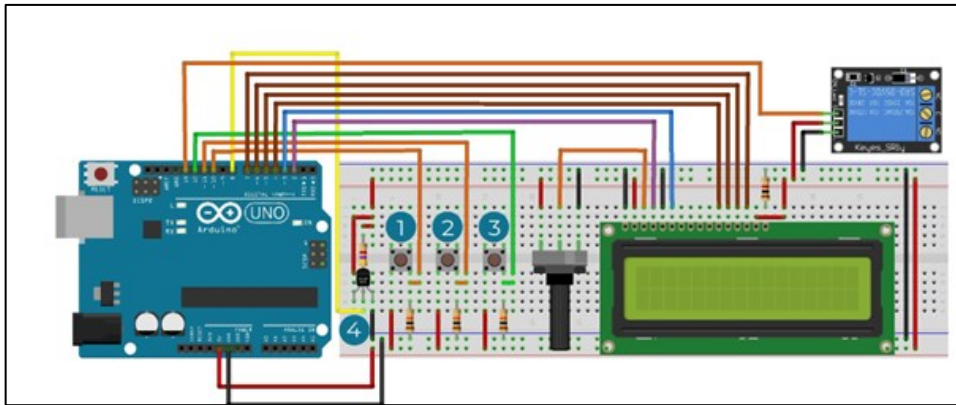
Para o sistema de aquecimento levantou-se a possibilidade de uso de um Arduino como controlador, programado especificamente para essa finalidade. O Arduino juntamente com um módulo leitor de temperatura Max6675 e termopar tipo K Figura 14 e 15, possibilitam a leitura da temperatura instantânea, já para a o controle da temperatura o Arduino é conectado a um módulo relé de acionamento, botões *push button* para o incremento dos valores de temperatura.

Figura 15 – Arduino com sensor de temperatura



Fonte: Maker Hero (2023)

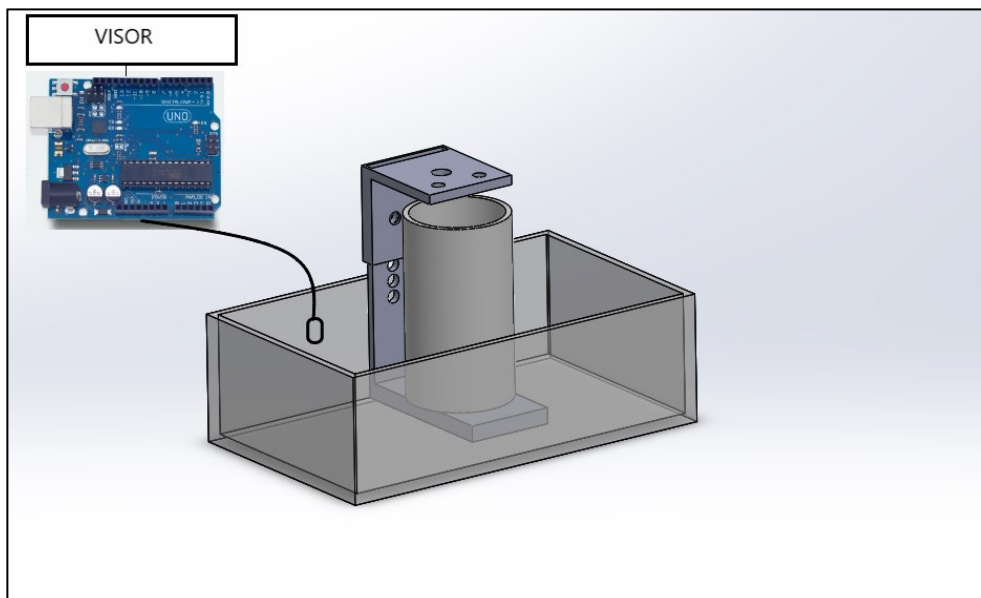
Figura 16 – Arduino com entradas e visor



Fonte: Usina Info Informática e Robótica (2023).

Com essas considerações, o projeto buscou criar uma célula de ensaio de corrosão eficiente, confiável e capaz de fornecer resultados representativos do ambiente industrial, auxiliando na pesquisa e desenvolvimento de materiais resistentes à corrosão. A Figura 16 exibe um esboço do projeto inicial.

Figura 17-Modelo inicial proposto



Fonte: autoria própria (2023)

4.2 Proposta desenvolvida

O material inicialmente levantado para receber a água em temperatura de ebulição e o receptáculo de *Nylon* foi o vidro temperado. O material atende as necessidades de troca de calor e leveza. Devido ao tempo de projeto e a viabilidade

de construção, foi optado pela aquisição de um receptáculo em vidro temperado com as dimensões já adequadas para a nossa aplicação. O objeto possui dimensões de 260x160x60mm e especificações de material que atendem as necessidades.

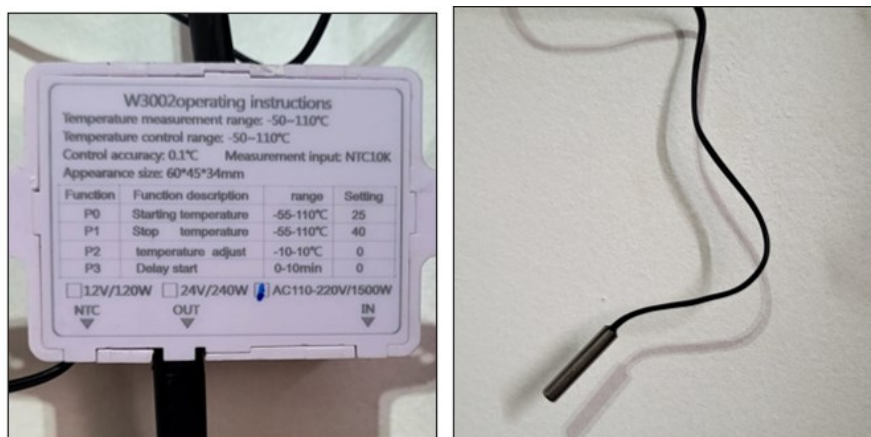
Para o controle de temperatura foi construído um sistema diferenciado da proposta inicial. Optou-se por um sistema de aquecimento com resistência diretamente imersa na água da marca Brasil resistências, modelo BREB, potência de 1000W e corrente de 7,87A. Com um sistema de controle de temperatura FullCenter modelo W3002 com range de temperatura de -50°C a 100°C, acurácia de 0.1°C, monido com um sensor de temperatura modelo DS18B20 conforme as figuras 17 e 18.

Figura 18 – a) Resistência para aquecimento, b) Controlador de temperatura do sistema.



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 19- a) Especificações do controlador de temperatura, b) Sensor de temperatura DS18B20.



Fonte: autoria própria (2023)

Para o “copo” de *Nylon* foi mantido o projeto original com dimensões de 65X115X3,5mm, Figura 19.

Figura 20- Copo *Nylon*.



Fonte: autoria própria (2023).

Para a conclusão da célula foi necessária a elaboração de um suporte para os eletrodos que irão realizar a DDP. Foi utilizada a tecnologia de impressão 3D para a elaboração do equipamento conforme Figura 20. O material selecionado para o suporte foi o, ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), que é um polímero amplamente utilizado devido à sua versatilidade e durabilidade. Suas características incluem resistência ao impacto e tração, tornando-o ótimo para aplicações que exigem durabilidade. Além disso, o ABS mantém estabilidade dimensional, mesmo sob variações de temperatura.

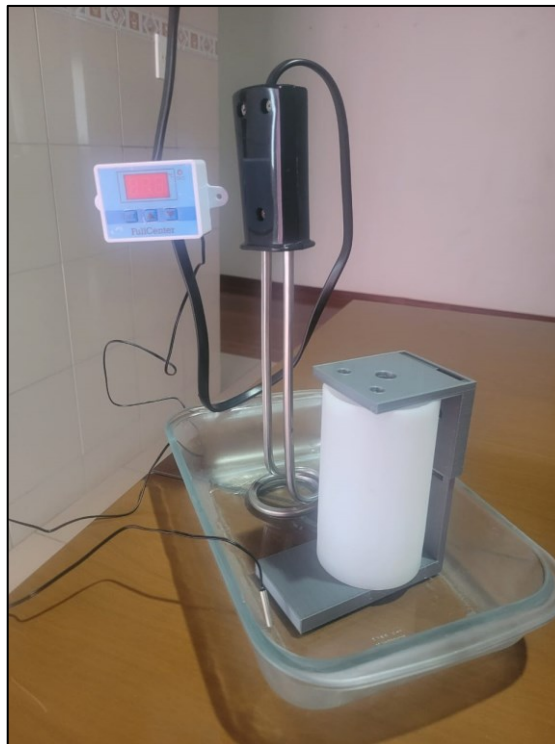
Figura 21- Suporte fabricação 3D.



Fonte: autoria própria (2023).

O projeto foi concluído, Figura 21, utilizando um receptáculo Marinex em vidro de dimensões 260x160x60mm, o que permite um bom distanciamento da base de polímero com a resistência elétrica e atende as propriedades do material propostas.

Figura 22- Conjunto concluído.



Fonte: autoria própria (2023).

No decorrer do experimento, conduzido para avaliar o tempo de aquecimento e eficiência do controle térmico, utilizaram-se valores estimados de potência de 1000W, partindo de uma temperatura inicial da água de 20°C e visando atingir uma temperatura final de 80°C. Observou-se que o tempo necessário para o aquecimento foi estimado em 5 segundos. Após alcançar a temperatura desejada, o controlador demonstrou capacidade de manter a estabilidade térmica, evidenciando sua utilidade de manutenção do ambiente aquecido.

4.3 COMPARATIVO DE PREÇOS

A pesquisa por alternativas mais inteligentes e mais acessíveis é uma constante na atualidade. No âmbito do estudo e ciência da corrosão, a fabricação de uma célula eletrolítica “caseira” por ser uma opção muito atrativa em comparação com a aquisição de uma célula pronta. Após o levantamento de componentes e construção da célula é viável a comparação financeira de uma nova com a produzida.

Foram levantados alguns modelos de células disponíveis no mercado, com base nas características desejadas. A primeira encontra-se na plataforma AliExpress do fabricante Gaoss Union, com preço de mercado de R\$4.754,93 Standart no modelo de 250ml e a de R\$ 5.939,79 500ml modelo PTFE Cell na data de elaboração desse trabalho.

Figura 23- Célula Standard.



Fonte: AliExpress (2023).

Figura 24- Célula PTFE cell.



R\$ 5.939,79
 +R\$5.510,41 estimados em imposto Q | 2x R\$3.044,14 com juros Q

Célula eletroquímica de teste de corrosão; célula eletrolítica

cor: 500ml PTFE cell

250ml Standard 250ml Jacketed 500ml Standard
 500ml Jacketed 1000ml Jacketed 1000ml Standard
 500ml PTFE cell

ponto de venda

- customizar: Pode ser utilizado para customizar chapéus, bonés, garrafas de natal, chá de bebê, pré-treino e para experiência de escrita.

Fonte: AliExpress (2023).

Levantou-se o modelo de célula de corrosão plano da LabSolutions, porém, até a data de realização desse trabalho não foi obtido retorno da empresa sobre o valor de comercialização dessa célula.

Figura 25- Célula de corrosão plana.



Início >
 Potenciostatos, eletrodos, células, corrosão, acessórios
 eletroquímica e microfluidica
 > Potenciostatos, Eletrodos e Células, Corrosão e Microfluidica
 > Célula de corrosão plana

Célula de corrosão plana

PREÇO SOB CONSULTA

Célula de corrosão plana (plataforma única) (CS936)

Fonte: LabSolutions (2023).

Por último foi observado o modelo de célula Sucker do fabricante Wuhu Yanjiao e-commerce Co., Ltd, disponível no site da Amazon, pelo valor de R\$6.448,00.

Figura 26- Célula de ensaio tipo Sucker.



Fonte: Site Amazon (2023).

Por Já no processo de fabricação da célula artesanal tivemos custos baixos se comparado com as células compradas. Os custos foram divididos em:

- Copo de Nylon, cortesia da tornearia João Paulo Bohacz, custo estimado de R\$100,00;
- Suporte de polímero, cortesia do laboratório de impressão 3D da UTFPR, custo estimado de R\$85,00
- Resistência elétrica com controlador de temperatura e sensor, R\$129,90;
- Recipiente de vidro temperado, R\$30,00.

Foram desconsiderados os custos dos eletrodos e outros componentes que o laboratório de corrosão da UTFPR-GP já possui. No total a célula de produção artesanal custo R\$159,90, sendo uma solução, 2973,69% mais barata que a célula de menor custo e 4032,5% mais barata que a célula de maior custo. Se considerado os valores estimados o custo total da célula seria de R\$344,90.

5 CONCLUSÕES

A realização da célula de corrosão apresentou resultados significativos, atendendo de forma eficiente os parâmetros estabelecidos para o controle de temperatura e as condições dos materiais utilizados na fabricação. O desempenho atingido da célula demonstrou ser uma alternativa viável e economicamente vantajosa em comparação com a aquisição de equipamentos novos no mercado.

A análise de custo da construção mostrou uma considerável economia, reafirmando a assertividade da escolha pela fabricação interna da célula. Esta escolha proporcionou uma solução personalizada, adaptada às necessidades específicas do projeto, e também permitiu a otimização dos recursos financeiros.

Dentro do projeto ainda existe a necessidade de ajuste de alguns detalhes, como o apoio da resistência e do indicador de temperatura, porém, a célula já está em condições de operação e pode ser utilizada na condução de experimentos.

No decorrer deste trabalho também foram abordados os tópicos de corrosões e os métodos de prevenção mais utilizados no mercado. O entendimento desses aspectos contribuiu para o escopo do projeto, mas também contribuiu para a abordagem geral de construção da célula de corrosão. O estudo dos diferentes mecanismos de corrosão e das estratégias de prevenção agregou ao desenvolvimento do projeto, refletindo em uma célula personalizada as necessidades.

Portanto o desenvolvimento da célula de corrosão não apenas atingiu seus objetivos primários, como também abriu caminho para futuros aprimoramentos e especificações. O conhecimento adquirido ao longo desse trabalho contribuirá para a continuidade de pesquisas na área, reforçando a importância da inovação e busca por soluções eficientes.

6 REFERÊNCIAS

ASHWORTH, V. (1987). **Corrosion Protection Techniques**. In “Corrosion: Industrial Problems, Treatments and Control Techniques” (pp. 1-15). Pergamon Press.

Célula de Corrosão Plana. LABSOLUTIONS. (2023). Disponível em: <https://www.labsolutions.com.br/produtos/celula-de-corrosao-plana/>. Acesso em: 24 nov. 2023.

Célula de Ensaio de Corrosão Tipo Sucker. Porta Amazon. (2023). Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Célula-ensaio-corrosão-tipo-sucker/dp/B0B84ZV82S>. Acesso em: 24 nov. 2023.

Célula Eletroquímica de Corrosão. Portal Aliexpress. (2023). Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/i/1005002239728451.html#nav-specification>. Acesso em: 24 nov. 2023.

DUTRA, A. C., & NUNES, L. de P. (1999). **Proteção Catódica: Técnica de Combate à Corrosão**. Interciência.

GENTIL, V. (1996). **Corrosão** (3ª ed.). Editora Guanabara Dois SA.

GENTIL, V. **Corrosão**. Grupo Gen. (2022). E-book. ISBN 9788521637998. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637998/>. Acesso em: 05 jun. 2023.

HALECK, L. (2018). **Corrosão Intergranular** (Intercristalina). Conpleq Consultoria. Disponível em: <http://www.conpleq.com.br/conpleq-consultoria-corrosao-intergranular-intercristalina/>. Acesso em: 27 abril 2023.

Homepage.Nexa Resources. (2023). Disponível em: <https://www.nexaresources.com/en/nexa/>. Acesso em: 15 mar. 2023.

KOCH, G. H., BRONGERS, M. P. H., THOMPSON, N. G., VIRMANI, Y. P., & PAYER, J. H. (2002). **Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States**. Supplement to Materials Performance, July 2002, Report No. FHWA - RD - 01 - 156. Federal Highway Administration, McLean, VA.

LABSOLUTIONS. Células de corrosão multifacetadas. Disponível em: <https://www.labsolutions.com.br/produtos/celulas-de-corrosao-multifacetadas/>. Acesso em: 12 dez. 2023.

KRUGER, J. (2000). **Cost of Metallic Corrosion**. In Uhlig's Corrosion Handbook (2nd ed., pp. 3-10). Wiley.

MANSFELD, F. (2005). **Corrosion: Understanding the Basics**. Journal of The Electrochemical Society, 152(6), B187-B194.

Medindo temperatura debaixo d'água com DS18B20. Maker Hero Loja Digital de Arduínos. (2023). Disponível em: <https://www.makehero.com/blog/sensor-de-temperatura-ds18b20-arduino/>. Acesso em: 22 out. 2023.

MITTELSTADT, F. G. (1993). **Avaliação Eletroquímica da Resistência a Corrosão do Aço ABNT 4140 Nitretado por Plasma.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Acesso em: 11 abril. 2023.

Nylon. Portal Virtuhab Universidade Federal de Santa Catarina. (2023). Disponível em: <https://portalvirtuhab.paginas.ufsc.br/nylon/>. Acesso em: 15 out. 2023.

POURBAIX, M. (1974). **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. National Association of Corrosion Engineers (NACE).**

Resolução - rdc nº 42, de 29 de agosto de 2013. Biblioteca Virtual de Saúde. (2023). Disponível em: https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2013/rdc0042_29_08_2013.html. Acesso em: 16 out. 2023.

SASTRI, V. S. (2011). **Corrosion Engineering: Principles and Practice.** Elsevier.

Termostato arduino com sensor de temperatura ds18b20 e relé. Usina Info Eletrônica e Robótica. (2023). Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/blog/termostato-arduino-com-sensor-de-temperatura-ds18b20-e-rele/>. Acesso em: 02 nov.2023.

TOLENTINO, N. M. de C. **Processos Químicos Industriais Matérias Primas, Técnicas de Produção e Métodos de Controle de Corrosão.** (2015). Editora Saraiva. E-book. ISBN 9788536531106. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536531106/>. Acesso em: 18 mar. 2023.

UHLIG, H. H. (1958). **The Corrosion Handbook.** John Wiley & Sons.

VERNON, W. H. J. (1957). **Metallic Corrosion and Conservation of Natural Resources** (pp. 105-133). Institution of Civil Engineers.

WOLYNEC, S. (2003). **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão.** EDUSP.