



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ANALÍTICA E FÍSICO – QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA BACHARELADO

NAARA DO VALE DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO TEOR DE CORROSIVIDADE: IMPACTO DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DO ESTADO DO CEARÁ EM MATERIAIS À BASE DE COBRE E
AÇO-CARBONO**

FORTALEZA

2024

NAARA DO VALE DE OLIVEIRA

ANÁLISE DO TEOR DE CORROSIVIDADE: IMPACTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
DO ESTADO DO CEARÁ EM MATERIAIS À BASE DE COBRE E AÇO-CARBONO

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Química do Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química com Habilitação Industrial.

Orientador Pedagógico: Prof. Dr. Pedro de Lima Neto

Orientadora Profissional: Dra. Paula Luciana Rodrigues de Sousa.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O48a Oliveira, Naara do Vale de.
Análise do teor de corrosividade: impacto das águas subterrâneas do estado do Ceará em materiais à base de cobre e aço-carbono / Naara do Vale de Oliveira. – 2024.
63 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Química, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Pedro de Lima Neto.
Coorientação: Profa. Dra. Paula Luciana Rodrigues de Sousa.
1. Águas subterrâneas. 2. Corrosão. 3. Aço-carbono. 4. Cobre. 5. Taxa de corrosão. I. Título.
CDD 540
-

NAARA DO VALE OLIVEIRA

ANÁLISE DO TEOR DE CORROSIVIDADE: IMPACTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
DO ESTADO DO CEARÁ EM MATERIAIS À BASE DE COBRE E AÇO-CARBONO

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Química do Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química com Habilitação Industrial.

Aprovada em: ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro de Lima Neto (Orientador Pedagógico)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Paula Luciana Rodrigues de Sousa (Orientadora Profissional)
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial Ceará (NUTEC)

Dr. Daniel de Castro Girão (Examinador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Assis e Marilde.

Ao meu irmão, Natanael.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua bondade e por me dar condições de terminar este trabalho, nada seria possível sem ele.

Aos meus pais, Assis e Marilde, por serem sempre os primeiros a apoiarem e acreditarem em nossos sonhos, e por nunca abrirem mão de garantir a mim e a meu irmão uma educação de qualidade.

Ao meu irmão Natanael, que a sua maneira, me ajudou na realização desse trabalho, assim como a minha formação.

À toda a minha família, que de forma direta ou indireta me ajudaram ao longo de toda minha graduação.

À minha querida amiga Graziela, por desde o ensino médio estar presente em minha vida e que ao longo dos anos tem se tornado uma verdadeira irmã para mim, sempre torcendo e me apoiando em cada sonho.

Ao Prof. Dr. Pedro de Lima Neto, por aceitar me orientar nesse trabalho e por desde o primeiro momento me acolher na iniciação científica e me abrir as portas para o universo da eletroquímica.

À Dra. Paula Luciana Rodrigues de Sousa, pela excelente orientação profissional e por ter me oferecido a chance de estagiar no Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

À Ma. Jéssica Juliane Porfírio, por toda a paciência e ajuda ao longo do período que me acompanhou na iniciação científica, por ter sido indispensável na contribuição da minha carreira científica

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC), por de prontidão aceitar me auxiliar na realização dos ensaios e por ter sido essencial no desempenho deste trabalho.

Ao Laboratório de Processos Oxidativos Avançados (LabPOA), pela contribuição no trabalho nas análises realizadas.

A todos os funcionários do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará, em específico ao Laboratório de Química Ambiental, por toda a orientação e apoio oferecido ao longo dos meses de estágio.

Aos colegas do Grupo de Eletroquímica e Corrosão (GELCORR), pela amizade construída ao longo dos anos, por toda a paciência e ensinamentos compartilhados, e por toda contribuição na minha carreira científica.

A todos os colegas que conheci durante a graduação e que fizeram parte da minha formação e para a realização deste trabalho.

Aos servidores da Universidade Federal do Ceará, que de alguma forma ajudaram para minha formação profissional durante a graduação.

A todos, que não mencionei, mas que contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O presente trabalho, tem por finalidade acompanhar taxa de corrosão e os parâmetros físico-químicos de Ferro Total, Cobre Total, pH e Condutividade ao longo de um período de 35 dias, frente a exposição das amostras de água em aço-carbono SAE-AISI 1020 e Cobre. Além disso, analisar pelo método gravimétrico de perda de massa, a taxa de corrosão desses metais após exposição a essas águas, e avaliar o teor de corrosividade. Assim como, estudar os potenciais de corrosão por métodos eletroquímicos. Os ensaios gravimétricos para perda de massa, foram realizados com base na ABNT por meio da NBR 6210 de 11/2008, que determina os processos necessários para realizar os estudos das taxas de corrosão. As análises físico-químicas de pH, Condutividade e Ferro Total foram realizadas conforme os procedimentos relatados no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater segundo descreveu a American Public Health Association (APHA). Com isso, as águas foram classificadas como baixas em corrosividade e moderadamente corrosivas, foi possível também observar que as amostras de água expostas ao aço carbono SAE-AISI 1020, os parâmetros físico-químicos estavam acima dos limites estabelecidos, ao contrário das amostras expostas ao Cobre, onde predominantemente, obtinham valores dentro dos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 396 de 3 de abril de 2008.

Palavras-chave: Águas subterrâneas; Corrosão; Aço-carbono; Cobre; Taxa de corrosão

ABSTRACT

The present study aims to monitor the corrosion rate and the physical-chemical parameters of Total Iron, Total Copper, pH, and Conductivity over 35 days, considering that water samples were exposed to SAE-AISI 1020 carbon steel and Copper. Furthermore, using the gravimetric mass loss method, analyze the corrosion rate of these metals after exposure to these waters, and evaluate the corrosivity. As well as studying corrosion potentials using electrochemical methods. The gravimetric tests for mass loss were performed based on the Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) through NBR 6210 of 11/2008, which determines the processes necessary to carry out the studies of corrosion rates. The physical-chemical analyses of pH, Conductivity, and Total Iron were performed according to the procedures reported in the Standard Methods for Examination of Water and Wastewater as described by the American Public Health Association (APHA). Therefore, the waters were classified as low in corrosivity and moderately corrosive. It was also possible to observe that the water samples exposed to SAE-AISI 1020 carbon steel had physical-chemical parameters above the established limits, unlike the samples exposed to copper, which predominantly obtained values within those established by CONAMA Resolution No. 396 of April 3, 2008.

Key-words: Groundwater; Corrosion; Carbon steel; Copper; Rate of corrosion

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da água na Terra	18
Figura 2 - Fluxograma simplificado do ciclo hidrológico.....	20
Figura 3 - Esquema do fluxo seguido no ciclo hidrológico.....	21
Figura 4 - Fins mais utilizados das águas subterrâneas	23
Figura 5 - Escala de pH	38
Figura 6 - Corpos de prova utilizados na pesquisa: a) Antes da lavagem; b) Depois da lavagem.....	42
Figura 7 - CP's imersos com tempo $t(h) = 0$	43
Figura 8 - CP's imersos com tempo de 35 dias (840 h).....	44
Figura 9 - CP's de Cobre após exposição de 35 dias (840 h).....	44
Figura 10 - CP's de Aço carbono após exposição de 35 dias (840 h).....	45
Figura 11 - Produto de corrosão de aço carbono	46
Figura 12 - Gráficos de a) Concentração de Ferro Total versus tempo (dias) e b) Concentração de Cobre Total versus tempo (dias)	47
Figura 13 - Gráfico de pH versus tempo (dias) das soluções expostas nos CP's de a) Aço-carbono e b) Cobre	48
Figura 14 - Gráfico de Condutividade versus tempo (dias) das soluções expostas nos CP's de a) Aço-carbono e b) Cobre.....	49
Figura 15 - Imagens de MO dos CP's AA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100	50
Figura 16 - Imagens de MO dos CP's BA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100	50
Figura 17 - Imagens de MO dos CP's CA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100	51
Figura 18 - Imagens de MO dos CP's DA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100	51
Figura 19 - Imagens de MO dos CP's EA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100	51
Figura 20 - Imagens de MO dos CP's FA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100	52

Figura 21 - Imagens de MO dos CP's AC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100	52
Figura 22 - Imagens de MO dos CP's BC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100 c) antes da exposição nas amostras com ampliação de x200 d) após exposição com ampliação de x200	53
Figura 23 - Imagens de MO dos CP's CC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100 c) antes da exposição nas amostras com ampliação de x200 d) após exposição com ampliação de x200	53
Figura 24 - Imagens de MO dos CP's DC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100 c) antes da exposição nas amostras com ampliação de x200 d) após exposição com ampliação de x200	54
Figura 25 - Imagens de MO dos CP's EC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100 c) antes da exposição nas amostras com ampliação de x200 d) após exposição com ampliação de x200	54
Figura 26 - Imagens de MO dos CP's FC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100 c) antes da exposição nas amostras com ampliação de x200 d) após exposição com ampliação de x200	54
Figura 27 - Variação do OCP versus tempo (segundos) das amostras de água em Aço-carbono	57
Figura 28 - Variação do OCP versus tempo (s) das amostras de água em Cobre	58
Figura 29 - Curvas de polarização linear potenciodinâmica nas amostras de águas subterrâneas em Aço-carbono	58
Figura 30 - Curvas de polarização linear potenciodinâmica nas amostras de águas subterrâneas em Aço-carbono	59

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Siglas dos critérios adotados no boletim epidemiológico23
- Tabela 2 - Alguns tipos de corrosão em superfícies metálicas26
- Tabela 3 - Fator de conversão (k) para a expressão da taxa de corrosão33
- Tabela 4 - Densidade do material metálico34
- Tabela 5 - Classificação da corrosividade34
- Tabela 6 – Legenda adotada das amostras e dos CP's40
- Tabela 7 - Concentração de Ferro Total nos CP's de aço-carbono ao longo dos dias46
- Tabela 8 - Concentração de Cobre Total nos CP's de cobre ao longo dos dias46
- Tabela 9 - Massas iniciais e finais dos CP's de Aço-carbono**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 10 - Taxa de corrosão dos CP's de Aço-carbono55
- Tabela 11 - Massas iniciais e finais dos CP's de Cobre**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 12 - Taxa de corrosão dos CP's de Cobre55
- Tabela 13 - Parâmetros eletroquímicos obtidos nas curvas de polarização58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAS	Associação Brasileira de Águas Subterrâneas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APHA	American Public Health Association (Associação Americana de Saúde Pública)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
LabPOA	Laboratório de Processos Oxidativos Avançados
LPC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão
LQA	Laboratório de Química Ambiental
MO	Microscopia Óptica
NUTEC	Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará
OCP	Open Circuit Potential (Potencial de Circuito Aberto)
PIB	Produto Interno Bruto
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedade Automotiva de Engenharia)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	17
2.1 <i>Objetivo geral</i>	17
2.2 <i>Objetivos específicos</i>	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 <i>Água</i>	18
3.1.1 <i>Ciclo hidrológico</i>	19
3.1.2 <i>Águas superficiais</i>	21
3.1.3 <i>Águas subterrâneas</i>	21
3.1.3.1 <i>Captação e distribuição de águas subterrâneas</i>	24
3.2 <i>Corrosão</i>	25
3.3 <i>Águas corrosivas</i>	31
3.4 <i>Corrosividade de águas subterrâneas</i>	32
3.5 <i>Taxa de corrosão</i>	33
3.6 <i>Impactos na indústria</i>	35
3.7 <i>Tubulações industriais</i>	35
3.7.1 <i>Aço – carbono</i>	36
3.7.2 <i>Cobre</i>	36
3.8 <i>Parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas</i>	37
3.8.1 <i>Potencial hidrogeniônico (pH)</i>	37
3.8.2 <i>Condutividade</i>	38
3.8.3 <i>Ferro total</i>	38
3.8.4 <i>Cobre total</i>	39
4. METODOLOGIA	39
4.1 <i>Medidas físico-químicas</i>	41
4.1.1 <i>Medidas da condutividade</i>	41
4.1.2 <i>Medidas do pH</i>	41
4.1.3 <i>Medidas da concentração de Fe²⁺</i>	41
4.1.4 <i>Medidas da concentração de Cu²⁺</i>	42
4.2 <i>Determinação da taxa de corrosão</i>	42
4.2.1 <i>Preparação dos CP's</i>	42
4.2.2 <i>Imersão dos CP's nas amostras</i>	43
4.3 <i>Métodos eletroquímicos</i>	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44

<i>5.1 Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados</i>	<i>46</i>
<i>5.2 Resultado das morfologias dos CP's após a exposição nas amostras.....</i>	<i>50</i>
<i>5.2.1 Morfologias dos Corpos de Prova de Aço-carbono após os ensaios eletroquímicos....</i>	<i>50</i>
<i>5.2.2 Morfologias dos Corpos de Prova de Cobre após os ensaios eletroquímicos.....</i>	<i>52</i>
<i>5.3 Resultado da taxa de corrosão por perda de massa</i>	<i>55</i>
<i>5.3.1 Resultados em Aço-carbono</i>	<i>55</i>
<i>5.3.2 Resultados em Cobre</i>	<i>56</i>
<i>5.4 Resultados dos ensaios eletroquímicos</i>	<i>57</i>
6 CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

No Planeta Terra, dos 2,5% de toda a água doce disponível, 29,9% são águas subterrâneas e superficiais. Essas águas são utilizadas para diversos fins, como consumo humano, irrigação, recreação e dessedentação de animais (BRASIL, 2008; Silva; Pereira, 2019). Em um boletim publicado em 2024 no estado do Ceará, dos 8.794.957 habitantes, cerca de 396.032 fazem o uso de soluções alternativas individuais, isto é, 4,50% da população utilizam águas de mananciais superficiais e subterrâneos por meio da água de chuva (Ceará, 2024).

A captação dessas águas subterrâneas, ocorre de maneira geral através de poços tubulares, e para que essa chegue até o seu destino, faz-se necessário a aplicação de diversos processos e dentre esses, faz-se o uso de um arranjo de tubulações com o objetivo de garantir o fornecimento contínuo de água para a população (Tsutiya, 2006).

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 396 de 3 de abril de 2008, estabelece alguns parâmetros físico-químicos de substâncias e de teores que devem estar presentes nas águas subterrâneas, onde, a partir desses valores, essas águas podem ser consideradas ou não próprias para consumo. No entanto, não existem parâmetros que qualifiquem essas águas em nível de características corrosivas ou incrustantes, mesmo havendo o monitoramento de parâmetros físico-químico. De acordo com Mesquita e Kellner (2015), ainda que haja o controle dos padrões físico-químicos que confere a uma água a qualificação de potável, ainda existem casos avaliados que se observa a água com características agressivas, isto é, corrosiva ou incrustante.

Para Tam e Elefsiniotis (2009), além de haver a alteração da qualidade da água com o fim de consumo, a existência de corrosão nas tubulações acarretam vazamentos de água, a perda da habilidade da rede hidráulica por conta de acúmulo dos produtos de corrosão, além de ocasionar na prematura falha de tubulações de água, e com isso, há comprometimento na estrutura na rede de distribuição da água.

Dentre os diversos parâmetros físico-químicos que são analisados em águas subterrâneas, o presente trabalho analisou os teores de Ferro Total e Cobre Total ao longo dos dias, frente a exposição dessas águas a amostras de metais que são usados em tubulações de água com o objetivo de monitorar o grau de corrosividade e incrustação das amostras, assim como os valores de Condutividade e pH. Os valores dos parâmetros físico-químicos obtidos

foram analisados com base nos valores permitidos pela Resolução CONAMA nº 396 de 3 de abril de 2008.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o teor de corrosividade do aço e cobre em águas subterrâneas do estado do Ceará, frente a aço carbono e Cobre.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a taxa de corrosão de aço carbono SAE-AISI 1020 e cobre pelo método gravimétrico de perda de massa;
- Analisar o potencial de corrosão de aço carbono SAE-AISI 1020 e cobre pelo método eletroquímico;
- Estudar a morfologia dos Corpos de Prova (CP's) antes e após a exposição nas amostras de águas subterrâneas nos ensaios eletroquímicos;
- Analisar a mudança dos parâmetros de pH, Condutividade, Ferro Total e Cobre Total com o tempo de exposição nas águas subterrâneas.

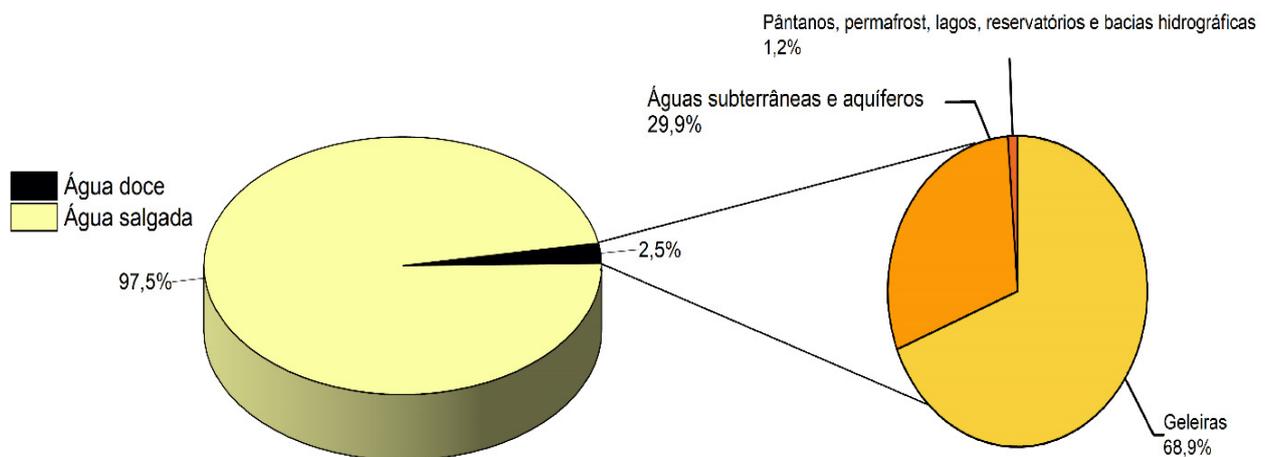
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Água

A água é um elemento essencial para a manutenção da vida. A maior parte do peso do corpo humano é constituída por água, variando de 45 a 75% do peso, dependendo do sexo e da idade, onde, em adultos, é considerado em média 60% do peso. A água atua em diversos processos no corpo humano, sendo imprescindível para a preservação da temperatura corporal através do processo de transpiração. Ademais, participa do transporte de nutrientes para as células, atua como um solvente e meio para que ocorram as reações químicas no corpo, entre outros (Azevedo *et al.*, 2016).

No Planeta Terra, existem predominantemente massas de água, onde essas, por sua vez, compõem a hidrosfera da Terra (Castro; Gonçalves, 2022). Do volume total de água da hidrosfera, apenas 2,5% designa-se como água doce. Do volume total de água doce, 68,9% se constitui de gelo e de neve localizado na Antártica, no Ártico e em regiões montanhosas. Cerca de 29,9% da água doce disponível se concentram nas águas subterrâneas e em aquíferos, 0,9% se situam em pântanos, permafrost e na umidade do solo, e os outros 0,3% se localizam em reservatórios, lagos e bacias hidrográficas, como é ilustrado na Figura 1 a seguir (Silva;Pereira, 2019).

Figura 1 - Distribuição da água na Terra



Fonte: Adaptado de Silva (2019)

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), define “uso consuntivo” quando ocorre o consumo total ou parcial da água retirada no processo que foi destinada, de modo que essa não retorna diretamente ao corpo d’água. No Brasil, as principais formas de uso consuntivos da água se dão no: abastecimento humano e animal, indústria de transformação, na rega e na evaporação líquida de tanques artificiais (ANA, 2019).

3.1.1 *Ciclo hidrológico*

O ciclo hidrológico pode ser definido como uma sequência de processos que ocorrem na natureza, em que a água parte de um estado inicial até retornar a sua situação original (Miranda *et al.*, 2010).

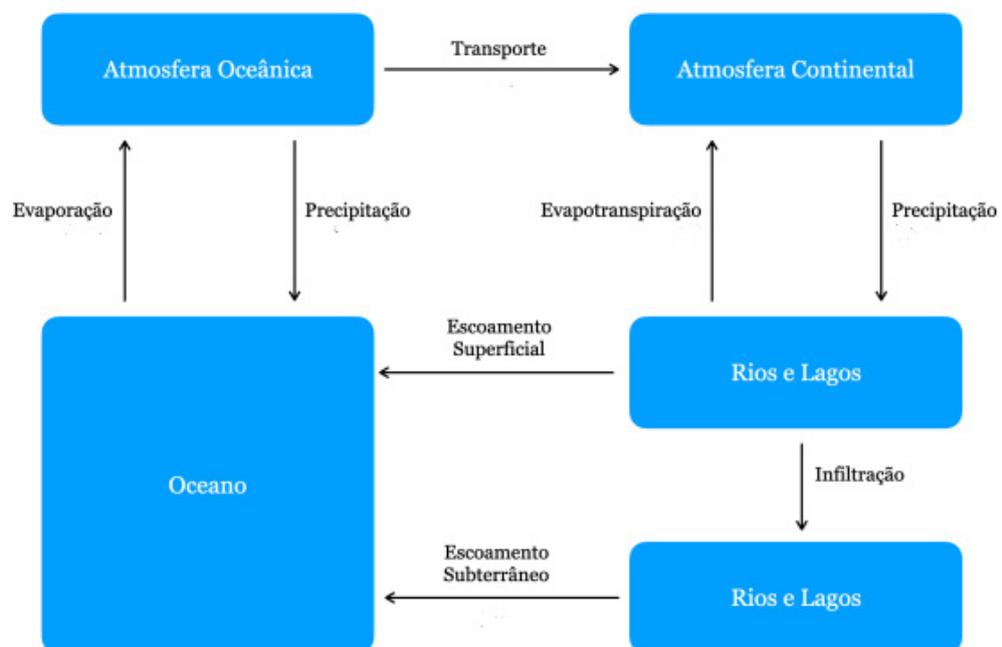
A única substância capaz de ser localizada em todos os estados da matéria (sólido, líquido e gasoso), além de estar subdividida em todos os ambientes do planeta Terra (atmosfera, oceanos e continentes) é a água. Porém, essas etapas não ocorrem de forma inerte, a água está constantemente em um curso contínuo, onde, muda de estado e ambiente. No ciclo hidrológico a água passa desde a atmosfera, em que se desloca por vários estados físicos, e se estende por outras etapas, como a precipitação, infiltração, escoamento subterrâneo, escoamento superficial, evaporação e evapotranspiração (Feitosa *et al.*, 2008).

O ciclo hidrológico pode ser dividido em sete etapas: Detenção, escoamento superficial, infiltração, escoamento subterrâneo, evapotranspiração, evaporação e precipitação. Na etapa de detenção, uma parte da precipitação ficará refreada na vegetação, nas depressões do terreno e em construções, dessa forma, a massa de água retornará a atmosfera através da evaporação, ou penetrará o solo pelo processo de infiltração. O escoamento superficial é estabelecido pelo escoamento da água sobre o solo, assim, corre para lugares em que há menor altitude até alcançar um corpo d’água, podendo ser um lago, rio ou oceano (Nunes; Rezende, 2022).

No entanto, a água resultante do escoamento superficial também pode infiltrar-se em camadas maiores do solo, assim como ficar retida ou até sofrer evaporação. Após o processo de infiltração, a água poderá ser evaporada, ser usada pela vegetação, fluir pela camada superior do solo ou até alimentar os lençóis freáticos das águas subterrâneas. O escoamento subterrâneo advém de parte da água penetrada na camada mais superior do solo, assim, esse escoamento ocorre de maneira bem mais demorada que o escoamento superficial.

A água advinda desse escoamento alimenta rios, e lagos, e mantém esses corpos durante épocas de estiagem. A vegetação é a responsável pelo processo de evapotranspiração, pois uma fração da água no solo é utilizada pela vegetação e as folhas eliminam essa água através do processo de evaporação. Com isso, através do processo de precipitação a água presente na atmosfera cai sobre o solo e sobre os corpos d'água, como observado a seguir na Figura 2. (Nunes; Rezende, 2022).

Figura 2 - Fluxograma simplificado do ciclo hidrológico



FONTE: Adaptado de Nunes e Rezende (2022)

Conforme descrito por Miranda *et al* (2010), a troca entre o fluxo da superfície terrestre e da atmosfera, acontece em dois sentidos, o sentido superfície-atmosfera e o sentido atmosfera-superfície. No sentido superfície-atmosfera, o curso de água ocorrerá essencialmente pela evaporação das águas dos oceanos e evapotranspiração do continente, ao passo que, no sentido atmosfera-superfície, a transição ocorrerá em qualquer estado físico, onde, geralmente ocorrerão na forma de precipitações pluviométricas, como é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Esquema do fluxo seguido no ciclo hidrológico



FONTE: Miranda *et al* (2010)

3.1.2 Águas superficiais

Águas superficiais relacionam-se a qualquer água líquida que é encontrada na superfície da Terra (Syeed *et al.*, 2023). Essas águas se referem às águas que estão armazenadas em lagoas ou lagos localizadas na superfície, ou águas que já estão na rede de riachos e rios e que escoam para os oceanos (Dooge, 2009).

Águas superficiais são uma das fontes principais para o abastecimento de água potável do planeta. Porém, o aumento do índice populacional acarretou um aumento no uso dessas águas, pois, diversas atividades cotidianas e de vários setores da economia utilizam essa fonte (Almeida *et al.*, 2021)

3.1.3 Águas subterrâneas

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na sua Resolução nº 396 de 3 de abril de 2008, águas subterrâneas podem ser definidas como águas que acontecem naturalmente ou artificialmente no subsolo (Brasil, 2008).

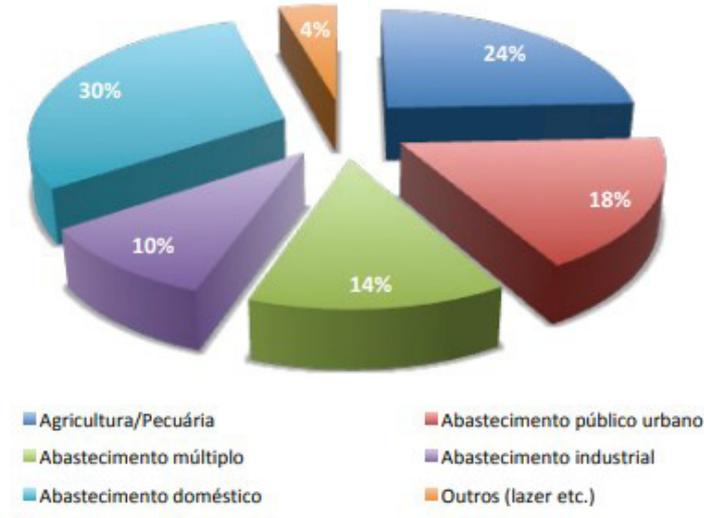
A Resolução CONAMA nº 396 de 3 de abril de 2008, classifica as águas subterrâneas em Classe Especial e em outras 5 Classes. A Classe Especial é caracterizada por serem águas dos aquíferos, de conjunto de aquíferos ou da porção desses que são destinadas para manutenção de ecossistemas em unidades de preservação que há proteção integral e as águas que contribuem de forma direta para alguns trechos de corpos de água superficial que se enquadram como Classe Especial. Já as outras 5 Classes, são águas de aquíferos que se classificam pela sua qualidade frente a atividades antrópicas, podendo ou não, exigir tratamento adequado para uso a depender da sua finalidade.

As águas subterrâneas se encontram sob a superfície da Terra, ocupando inteiramente os poros das rochas e dos sedimentos e, dessa forma, formando os aquíferos. Essas águas são vitais para a vida, pois além de abastecerem cidades e o campo e serem utilizadas em atividades econômicas, também sustentam diversos sistemas aquáticos, como lagos, rios, pântanos e mangues. Além disso, diversas florestas localizadas em regiões de clima áridos ou tropicais se sustentam graças a essas águas subterrâneas. Outrossim, ambientes aquáticos não subsistiriam nem executariam suas atribuições ambientais. Se caracteriza como o recurso natural mais explorado do subsolo brasileiro (Hirata *et al.*, 2019).

É possível afirmar que a quantidade total de água bombeada nos mais de 2,5 milhões de poços tubulares existentes, supera o valor de 17.580 mm³/ano. Este é o volume médio considerado necessário para abastecer a cada ano a população no Brasil atualmente, a qual corresponde a cerca de 217 milhões de pessoas (Hirata *et al.*, 2019).

Existe uma ampla gama de atividades econômicas que usufruem das águas subterrâneas no Brasil, predominantemente, o abastecimento doméstico é setor que mais usufrui dessa fonte, seguido da agricultura e pecuária, como é possível observar na Figura 4.

Figura 4 - Fins mais utilizados das águas subterrâneas



FONTE: Hirata *et al* (2019)

No estado do Ceará, no ano de 2024, foi publicado um boletim com a situação da qualidade e do abastecimento das águas para a população. Alguns dos critérios adotados para a quantificação são dados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Siglas dos critérios adotados no boletim epidemiológico

Sistema de Abastecimento de Água (SAA)	Instalações compostas por um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos destinada à produção e distribuição de água tratada através da rede canalizada para a população.
Solução Alternativa Coletiva (SAC)	Modalidade de abastecimento, através de equipamentos fixos ou móveis, com ou sem canalização e sem rede de distribuição.
Solução Alternativa Individual (SAI)	Modalidade de abastecimento de água para consumo humano que atende a domicílios residenciais com uma única família, incluindo seus agregados familiares. Faz-se o

**uso de água direta dos mananciais
subterrâneos e superficiais e
através de águas de chuva.**

FONTE: Produzida pelo autor com base nos dados de Ceará (2024)

De acordo com o boletim, no estado do Ceará, de 8.794.957 habitantes, 8.023.421 da população dispunha de sistemas de abastecimento, o que corresponde a 91,23%; 396.032 é abastecida por soluções alternativas coletivas, isto é, 4,50%; e 338.966 é abastecida por soluções alternativas individuais, ou seja, 3,85%; e 36.538 de habitantes, isto é, 0,42% da população não dispunha das informações (Ceará, 2024). Dessa forma, é possível observar uma parcela da população que depende dessas fontes de águas subterrâneas.

No estado do Ceará, nos anos de 2015 à 2018, mais de 3 mil poços foram perfurados exclusivamente para fins de abastecimento das populações das cidades e da zona rural (Hirata *et al.*, 2019).

3.1.3.1 Captação e distribuição de águas subterrâneas

As captações de águas subterrâneas podem ser realizadas através da implementação de poços. A Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS) descreve que esses poços podem ser de diversas profundidades e diâmetros, porém, é possível dividi-los em dois grupos. Pode ser definido como poço tubular profundo, englobando os poços artesianos e semi-artesianos, é caracterizado por ser uma obra de engenharia geológica que possibilita o acesso à água subterrânea e produzida utilizando sonda perfuratriz com perfuração vertical e pode possuir uma profundidade de até 2000 metros. Já o outro grupo pode ser identificado como poço raso, cisterna, cacimba ou amazonas. São poços escavados de modo manual e recobertos com tijolos ou anéis de concreto, podem recolher água do lençol freático e podem possuir uma profundidade de até 20 metros (ABAS, 2005).

Para que a água chegue até o consumidor final, é necessário que haja diversos processos incluídos nesse sistema de abastecimento, indo desde a captação no corpo de água que será utilizado, até a rede de distribuição que realizará o compartilhamento da água. A rede de distribuição é definida como um arranjo de tubulações e órgãos acessórios, que possui um fim de fornecer água potável para os consumidores continuamente, com quantidade, qualidade

e adequadas pressões. É o elemento que, de todo o sistema de abastecimento, detém o maior custo, significando cerca de 50 a 75% do valor total da obra de abastecimento (Tsutiya, 2006).

3.2 Corrosão

A corrosão pode ser definida como o resultado destrutivo da reação química entre um metal ou uma liga metálica e seu ambiente (Jones, 1996). Gentil (2011) , também definiu a corrosão como um processo de deterioração de um determinado material, sendo geralmente metálico, essa deterioração pode se dar por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo está relacionada ou não a esforços mecânicos. Tais reações são prejudiciais e indesejáveis, pois acarretam no desgaste do material, variações químicas ou modificação da estrutura, tornando seu uso inadequado. Uma ampla gama de componentes metálicos se deteriora com o uso, a depender do nível de exposição a ambientes corrosivos e oxidantes (Ferreira *et al.*, 2002).

Os motivos principais que ocasionam em corrosão são: química, galvânica e eletrolítica. A corrosão química se dá pela forma em que a superfície metálica interage com o agente oxidante, a corrosão galvânica é acarretada quando não existe uniformidade entre a espécie metálica e o meio corrosivo, com isso, há diferença de potencial. A corrosão eletrolítica acontece quando há aplicação de corrente de uma fonte externa e o metal atuará como ânodo, ou seja, é um processo que não há espontaneidade de reação entre o metal e o meio (Gentil, 2011).

Segundo Ferreira *et al.* (2002), existem diferentes tipos de corrosão, onde é possível classifica-las pela aparência ou maneira de ataque, assim como os diferentes motivos da corrosão. Dessa forma, é possível diferenciar a corrosão por:

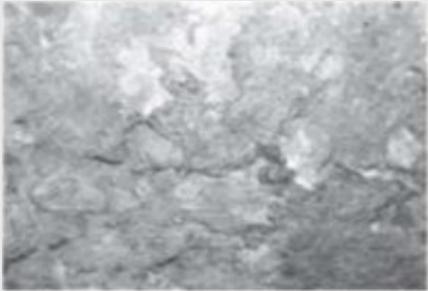
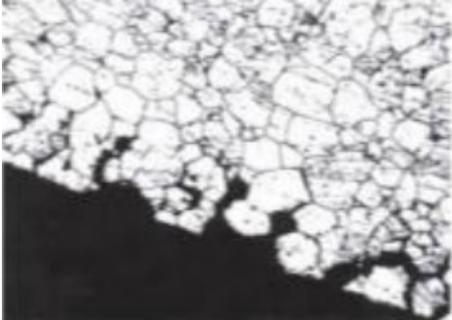
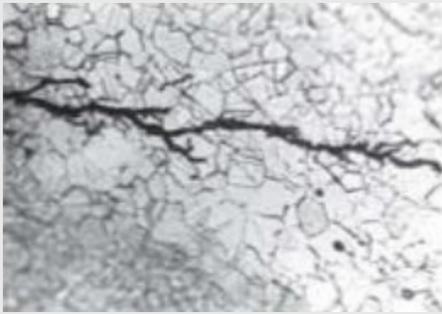
- Sua morfologia: uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular, intragranular, filiforme, por esfoliação, grafítica, desincificação, em torno do cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;

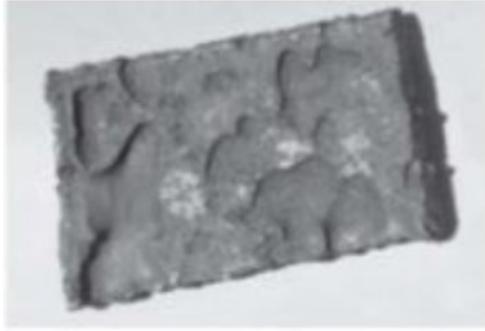
- Suas causas ou mecanismos: por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno de cordão de solda, seletiva (grafítica e desincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;

- Seus fatores mecânicos: sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- Seu meio corrosivo: atmosférica, pelo solo, induzida por microrganismos, pela água do mar, por sais fundidos, etc.;
- A localização do ataque: por pite, uniforme, intergranular, transgranular.

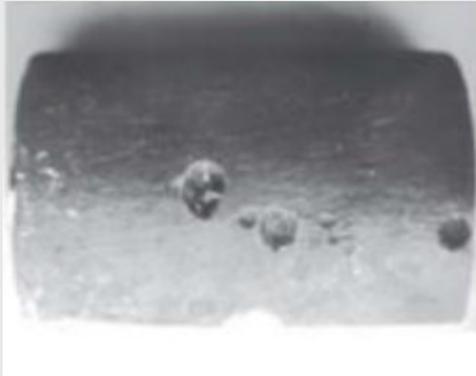
A Tabela 2 ilustra alguns tipos de corrosão que ocorrem em superfícies metálicas.

Tabela 2 - Alguns tipos de corrosão em superfícies metálicas

Tipo de corrosão	Imagem	Definição
Uniforme		Ocorre em toda extensão da superfície do substrato, ocorrendo perda uniforme de espessura, também chamada de corrosão generalizada.
Intergranular		Se processa entre os grãos da rede cristalina do material, fazendo com que as propriedades mecânicas mudem e frature caso aplicado muito esforço mecânico.
Transgranular		Ocorre nos grãos da rede cristalina, também podendo fraturar sob o menor esforço mecânico.

Em placas

Ocorre em regiões da superfície do material, e não por toda ela, formando placas com escavações.

Alveolar

Ocorre formando cavidades aprestando fundo arredondado e normalmente com profundidade menor que seu diâmetro.

Puntiforme (pite)

Ocorre em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície de material, produzindo pites, que são cavidades com fundo angular e profundidade maior que seu diâmetro.

Filiforme

Ocorre sob a forma de finos filamentos que se propagam de maneira irregular e para todas as direções, porém sem se ultrapassarem, pois admite-se que o coloide do produto de corrosão apresenta carga positiva ocasionando essa repulsão.

FONTE: Paolini (2019)

Quando há um processo de corrosão, as reações eletroquímicas incluídas são definidas como reação de oxidação e de redução, para explicar o mecanismo dessas reações de oxirredução diversos conceitos são apresentados. É possível considerar a reação ocorrendo em termos de oxigênio, onde, na oxidação haverá o ganho de oxigênio de uma substância e na redução haverá a perda de oxigênio de uma substância. Outro mecanismo é possível se levado em conta em termos de elétrons, em que, a oxidação é a eliminação de elétrons em uma substância química e redução é o ganho de elétrons em uma substância química. Além disso, considera-se também em termos de número de oxidação, onde, na reação de oxidação terá um aumento algébrico do número de oxidação, e a reação de redução acarretará uma diminuição algébrica no número de oxidação. Ao se comparar os três conceitos, é possível constatar que em reações de corrosão, as reações que levam em conta os elétrons são mais amplos e com enorme aplicabilidade (Gentil, 2011).

O processo de corrosão se dá de modo espontâneo, onde, o metal inclina-se para seu estado de energia mais reduzida, isto é, da forma que são encontrados na natureza, dessa forma, ele retorna ao estado de sais metálicos ou de óxidos. Logo, produtos resultantes de processos corrosivos são mais estáveis termodinamicamente ao se comparar com o metal reduzido, assim, se entende a razão termodinâmica para o processo espontâneo da corrosão (Paolini, 2019). Como o processo corrosivo é espontâneo, o substrato metálico é transformado de tal forma que a durabilidade e o desempenho desses materiais não mais satisfazem seu fim a qual foi destinado (Gentil, 2011).

Como já descrito anteriormente, quando uma espécie metálica é inserida em uma solução eletrolítica, no caso, no seu meio corrosivo, é estabelecida uma diferença de potencial na fronteira entre o metal e a solução eletrolítica, onde, é estabelecida uma dupla camada elétrica (Hilsdorf *et al.*, 2004).

Tal diferença de potencial é de natureza elétrica e de natureza química, logo, usa-se a denominação diferença de potencial eletroquímico. Diante dessa situação, três possibilidades existem. A primeira ocorre quando o potencial dos íons metálicos contidos na rede cristalina metálica for maior que o potencial dos íons metálicos contidos na solução, com isso, existirá espontaneamente a tendência desses íons passarem para a solução e o material metálico ficar com carga elétrica negativa em excesso, já que, os elétrons não podem permanecer livres na solução e assim, ficam no metal. Por consequência o potencial elétrico

do metal diminui e o acesso de íons metálicos para a solução é dificultado e, com isso, esses íons irão se transferir até que haja um equilíbrio entre o potencial do metal com o potencial da solução, logo, o potencial elétrico do metal será um valor negativo com relação à solução (Gentil, 2011).

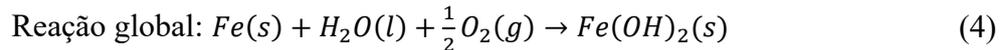
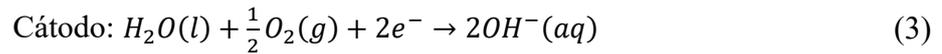
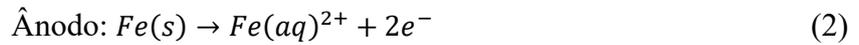
Outra possibilidade existe quando o potencial dos íons metálicos contidos na solução for maior que o potencial dos íons metálicos contidos na rede cristalina, nesse caso, ocorrerá a reação inversa, os íons que estão na solução passarão para o material metálico que ficará com carga positiva e, portanto, com potencial elétrico mais alto. Isso resultará na transferência de íons até atingir um equilíbrio entre o potencial da solução com o potencial do metal que por sua vez, este terá um potencial elétrico positivo com relação à solução. Por fim, há a possibilidade de o material metálico possuir o mesmo potencial da solução desde o princípio, nesse caso, não existirá nenhuma transferência de íons de um meio para o outro, e o potencial elétrico da solução será o mesmo do metal. (Gentil, 2011)

Conforme descrito por Papavinasam (2021), em um mecanismo eletroquímico, quatro elementos são necessários para que ocorra a corrosão, sendo eles, o ânodo, o cátodo, o condutor metálico e o condutor eletrolítico. Dos quatro elementos citados, ânodo, cátodo e condutor metálico, estão presentes em metais ou em ligas metálicas. Já o condutor eletrolítico é um líquido iônico condutor, sendo geralmente uma solução aquosa, ou um sólido condutor iônico. A corrosão é efetuada quando um metal ou uma liga metálica é inserido em uma solução condutora iônica. No ânodo, os íons metálicos saem da superfície do metal e se dirigem para o condutor eletrolítico, deixando para trás os elétrons na superfície do metal, dessa forma, o material metálico sofre oxidação no ânodo. Assim, o processo anódico, ou corrosivo, de um metal (M^{n+}) pode ser descrito conforme a Eq (1), e de maneira análoga, o processo catódico, ou de redução, de um metal (M), se dá pela inversão da equação:

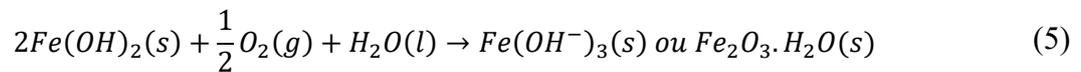


Em tal processo corrosivo, os íons no metal movem-se do ânodo para o cátodo através do eletrólito e os elétrons são levados do ânodo para o cátodo pelo condutor metálico, isto é, pelo próprio metal. Faz-se importante ressaltar que não necessariamente o íon metálico irá sofrer redução no cátodo, já que, além de conter íons metálicos, o elétrico utilizado poderá possuir outros íons, que, por sua vez, podem sofrer redução. Portanto, em grande parte dos casos, a corrosão irá resultar na perda de metal na superfície metálica, provocando assim, o desgaste do metal ou da liga metálica.

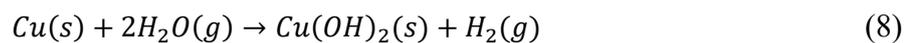
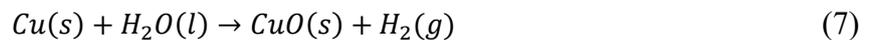
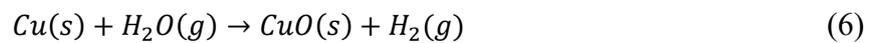
Com isso, é possível visualizar o exemplo do ferro em um meio aquoso, pois, quando estão no estado fundamental, os metais de um modo geral possuem de um a três elétrons no último nível com maior energia, por conseguinte, quando reagem tendem a perder esses elétrons, ou seja, se oxidam, como observado nas equações 2,3 e 4 (Gentil, 2011).



No entanto, a reação prossegue, e o $\text{Fe}(\text{OH})_2$ continua se oxidando e forma a ferrugem, demonstrado na Equação 5 (Paredes, 2018).



Da mesma forma, o cobre pode ser corroído quando presente em soluções que possuem oxigênio dissolvido, pois possuem a capacidade de ativar a superfície do metal, o que acarreta na produção de uma película protetora. Essa película é constituída de óxido cuproso (Cu_2O), óxido cúprico (CuO) e de hidróxido de cobre (II) ($\text{Cu}(\text{OH})_2$), como é possível observar nas equações 6,7 e 8 (Pourbaix; Staehle, 1973; Souza, 2022).



3.3 Águas corrosivas

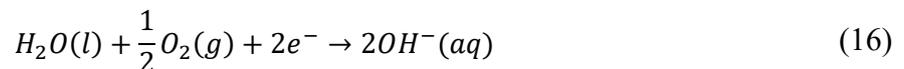
A água, quando quimicamente pura, constitui-se por moléculas, as quais se apresentam de forma associadas por conta das ligações por ponte de hidrogênio. As demais substâncias presentes, estando dissolvidas ou em suspensão, podem ser definidas como impurezas, por exemplo: sais, ácidos, bases e gases dissolvidos, material em suspensão e microrganismos. A depender do objetivo desejado, é necessário condicionar a água de uma forma a evitar não apenas problemas de utilização, mais também problemas de corrosão, advindas dessas impurezas (Gentil, 2011).

Para Lane (1993), o grau de corrosividade de uma água dependerá unicamente de seu grau de saturação com os íons ou moléculas do corpo metálico ou do composto em que

está em contato. Existem propriedades contidas na água que podem aumentar o nível de corrosão, dentre eles: baixo valor de pH, alcalinidade reduzida, dureza menor que 60 mg L⁻¹ de CaCO₃, concentrações de cloro, sulfato e de oxigênio dissolvido elevados, pH reduzido em conjunto com elevada condutividade elétrica (> 500µS.cm⁻¹) e cloro livre maior que 1 mg L⁻¹ (Lane, 1993).

Segundo escreveu Gentil (2011), os materiais metálicos que estão em contato com a água tenderão a sofrer corrosão, e isso dependerá de quais substâncias estarão contaminando-as. Entre os contaminantes mais frequentes, destacam-se:

- Gases dissolvidos — oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono, cloro, amônia, dióxido de enxofre, trióxido de enxofre e gás sulfídrico. O oxigênio e o dióxido de carbono são naturalmente encontrados na água, enquanto os demais provém da absorção de poluentes da atmosfera ou de tratamentos usando o cloro. Quando há a presença de oxigênio, ocorre o aumento da velocidade do processo corrosivo, pois reduzirá na área catódica, conforme a Equação 16:



- Sais dissolvidos, como por exemplo, cloretos de sódio, de ferro e de magnésio, carbonato de sódio, bicarbonatos de cálcio, de magnésio e de ferro. Agem acelerando ou reduzindo a velocidade de corrosão, pois, a depender do sal, ocorre um aumento de condutividade, este por sua vez, é essencial para o mecanismo eletroquímico de corrosão;

- Matéria orgânica de origem animal ou vegetal;

- Bactérias, limos e algas;

- Sólidos suspensos.

Além disso, também deve-se considerar o pH, a temperatura, a velocidade e a ação mecânica.

Tsutiya (2006), propõe que em qualquer instalação de extração de águas subterrâneas, e mesmo em poços, é possível a ocorrência de fenômenos corrosivos, pois a água está quimicamente ativa e possui características de eletrólito. Tal fenômeno de natureza química se relaciona com a presença de CO₂, O₂, H₂S, ácidos orgânicos e de sulfatos ferrosos na água, ocasionando na redução da espessura do metal, o que por sua vez pode acarretar na

perfuração, isto é, o poço não será mais tão resistente e os filtros terão abertura alargada, podendo causar passagem de areia.

3.4 Corrosividade de águas subterrâneas

De acordo com um estudo realizado por Kellner e Oliveira (2022), ao expor amostras de água subterrâneas a amostras de tubos de cobre, verificou-se uma tendência a corrosividade de baixa a alta. Além disso, em meio aquoso houve um aumento na concentração de íons cobre, variando de $1,006 \pm 0,025 \text{ mgCu L}^{-1}$ a $1,614 \pm 0,051 \text{ mgCu L}^{-1}$. Logo, verificou-se a capacidade de águas subterrâneas serem agressivas e corrosivas, podendo alterar as estruturas metálicas de tubulações de cobre.

Kalyani *et al.* (2017), determinou a agressividade de amostras de águas subterrâneas em relação à corrosão de diversos metais importantes comercialmente, a saber, aço-carbono, alumínio, cobre e liga de cobre e níquel. A partir de ensaios gravimétricos foram obtidos valores experimentais de corrosividade. Os resultados constataram que em aço-carbono, os valores de taxa de corrosão chegaram a alcançar $0,14 \text{ mm ano}^{-1}$, já para cobre, o valor máximo alcançado foi de $0,006 \text{ mm ano}^{-1}$. Logo, apesar de sofrer corrosão, os materiais formados por cobre demonstraram maior resistência a corrosão ao serem comparados com o aço-carbono.

Confome Costa *et al* (2022) ,ao analisar a composição de águas subterrâneas de cinco poços profundos que estão localizados no estado do Ceará, foi constatado que, além de possuírem condutividade elétrica elevada, variando de $2935 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$ a $8350 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$, os índices avaliados demonstraram que as águas possuíam também, uma elevada tendência à corrosão, comprometendo a potabilidade dessas águas.

Segundo Gebremikael e Dawod (2021), após ser constatado no sistema de distribuição de água problemas de corrosão e de incrustação, foi investigado o potencial de corrosão e a formação de incrustação de amostras de águas subterrâneas. Com isso, atestou-se que águas subterrâneas de determinados pontos, apresentavam características corrosivas, causando danos não só a rede de distribuição, como também a saúde pública.

3.5 Taxa de corrosão

Pode-se definir a taxa de corrosão como a rapidez em que ocorre a interação do metal com o ambiente em que se encontra. De modo geral, a taxa de corrosão é quantificada por variação de massa (Matlakhov, 2021).

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da NBR 6210 de 11/2008, a qual determina os quesitos aos quais os corpos-de-prova metálicos precisam ser submetidos para estudos da taxa de corrosão, a taxa de corrosão por variação de massa pode ser definida pela Equação 17:

$$r_{corr} = \frac{k \cdot W}{A \cdot t \cdot d} \quad (17)$$

Onde:

r_{corr} é a taxa de corrosão expressa na unidade desejada (conforme expresso na Tabela 3)

k é a constante que depende da unidade desejada (conforme expresso na Tabela 3)

W é a perda de massa, expressa em gramas (g) = $m_i - m_f$

A é a área do corpo de prova expressa em centímetros quadrados (cm^2)

t é o tempo de exposição, expresso em horas (h)

d é a densidade (conforme expresso na Tabela 4)

Tabela 3 - Fator de conversão (k) para a expressão da taxa de corrosão

EXPRESSÃO	FATOR DE CONVERSÃO (k)
Milésimo de polegada por ano (mpy)	$3,45 \cdot 10^6$
Milímetro por ano (mm/ano)	$8,76 \cdot 10^4$
Micrometro por ano (μm/ano)	$8,76 \cdot 10^7$
Gramas por m^2 por hora ($g / (m^2 \cdot h)$)	$1,00 \times 10^4 \cdot d$
Miligrama por dm^2 por dia (mdd)	$2,40 \times 10^6 \cdot d$
Micrograma por m^2 por segundo ($\mu g / (m^2 \cdot s)$)	$2,78 \times 10^6 \cdot d$

FONTE: ABNT/ NBR 6210 de 11/2008

Os valores de densidade são expressos na Tabela 4:

Tabela 4 - Densidade do material metálico

Material metálico	Densidade
Aço-carbono	7,87
Alumínio	2,72
Cobre	8,92
Zinco	7,14

FONTE: ABNT/ NBR 6210 de 11/2008

É possível comparar a taxa de corrosão com o índice de corrosividade a partir da Tabela 5:

Tabela 5 - Classificação da corrosividade

Taxa de corrosão (mm/ano)	Corrosividade
< 0,025	Baixa
0,025 a 0,12	Moderada
0,13 a 0,25	Alta
> 0,25	Severa

FONTE: National Association Corrosion Engineers (2018)

3.6 Impactos na indústria

Os impactos industriais da corrosão em estruturas metálicas, equipamentos e seus componentes, geram prejuízos econômicos em diversos setores. Essas perdas econômicas, de modo geral, podem ser divididas em dois tipos: perdas econômicas diretas e indiretas. As perdas econômicas diretas dizem respeito aos custos de: produtos metálicos acabados e semiacabados, estruturas, equipamentos e seus componentes completamente corroídos, reparo de estruturas, equipamentos e seus componentes parcialmente corroídos, substituição de estruturas e equipamentos e seus componentes completamente ou parcialmente corroídos. Estima-se que as perdas econômicas totais (diretas e indiretas) ocasionadas pela corrosão, correspondem a 1-5% do Produto Interno Bruto (PIB). A Organização Mundial de Corrosão aponta que as perdas por ano na economia mundial, ligadas a corrosão alcançam \$ 2,5 trilhões

(o que corresponde de 3 a 4% do PIB de países industrializados). No Brasil, no ano de 2015, foi possível constatar o número de 4%, ou seja, R\$ 236 bilhões (Matlakhov, 2021).

Os prejuízos econômicos diretos, equivalem a 20% da produção anual do ferro fundido. Já as perdas econômicas indiretas dizem respeito aos custos de: fabricação de estruturas, equipamentos e seus componentes de materiais mais resistentes à corrosão, fabricação de estruturas, equipamentos e seus componentes superdimensionados a fim de prolongar a sua vida útil, inspeção e manutenção (preventivas e operacionais) de estruturas, equipamentos e seus componentes, revestimentos protetores temporários e permanentes aplicados, inibidores de corrosão utilizados, sistemas de proteção eletroquímica catódica e anódica e sua inspeção e manutenção e contaminação do meio ambiente com produtos perigosos causada pela corrosão de estruturas, equipamentos e seus componentes (Matlakhov, 2021).

3.7 Tubulações industriais

Definem-se tubos, como condutos fechados que são destinados principalmente para o transporte de fluidos. Todos os tubos são de forma circular, e se apresentam como cilindros ocos. Já uma tubulação pode ser definida como um conjunto de tubos e de seus demais acessórios. Faz-se necessário o uso de tubulações, principalmente, pelo fato de o ponto de geração ou de armazenamento dos fluidos em questão estarem distantes do seu ponto de utilização (Telles, 2001).

Tubulações são usadas para o transporte de materiais com capacidade de escoar, ou seja, aqueles fluidos conhecidos, líquidos ou gasosos, materiais pastosos e fluidos contendo sólidos em suspensão, estando todos em uma faixa de variação de pressões e temperaturas que são empregadas na indústria: a partir do vácuo absoluto até cerca de 1000 MPa, o que corresponde a cerca de 100 kg mm⁻². Essas tubulações utilizadas podem ser de diversos materiais, é possível utilizar tubos ferrosos, como aços-carbono, aços inoxidáveis, ferro fundido e ferro forjado. Assim como tubos não-ferrosos, como cobre, alumínio, níquel e ligas, chumbo, dentre outros (Telles, 2001).

3.7.1 Aço – carbono

Ao comparar todos os materiais existentes na indústria, constata-se que o aço carbono apresenta menor relação custo/resistência mecânica, é um material com facilidade

para solda e conformação e é encontrado facilmente no comércio. Por isso, o aço – carbono também é chamado de “material de uso geral” nas tubulações industriais. Pode ser empregado para água doce, vapor de baixa pressão, condensado, ar comprimido, óleos, gases e diversos outros fluidos com baixa corrosividade e com temperaturas desde 45° C, e a qualquer pressão. À medida que se aumenta a quantidade de carbono no aço, há um aumento nos limites de resistência e de escoamento e na temperabilidade do aço (Telles, 2001).

O aço carbono pode ser considerado como uma liga de ferro-carbono, porém, também contém teores de silício, manganês, fósforo e enxofre. É classificado de acordo com o teor de carbono presente em sua composição, no geral, contém um teor de até 2,0% em relação aos demais elementos presentes. Pode ser classificado a depender da quantidade de carbono presente na liga, sendo baixo carbono, quando contém no máximo 0,30% de carbono; médio carbono, quando possui de 0,30 a 0,60%; e alto carbono, quando possui de 0,60 a 1,00% de carbono. As normas da Sociedade Automotiva de Engenharia (Society of Automotive Engineers - SAE) e do Instituto Americano de Aço (American Iron and Steel Institute - AISI), designam o aço carbono SAE-AISI 1020 contendo em média 0,20% de carbono em sua composição (Aperam, [s. d.]; Brunatto, 2016; Santos; Santana, 2019; Singh, 2020).

3.7.2 Cobre

Dentre as vantagens, o cobre é utilizado pela sua boa resistência a corrosão, sua resistência e facilidade de fabricação (Singh, 2020).

Fabrica-se tubos com uma grande variedade de materiais que contenham cobre e suas ligas, no entanto, o uso desses materiais tem sido reduzido pelo seu elevado custo. Porém, esses tubos apresentam uma excelente resistência ao ataque da atmosfera, da água (incluindo a água salgada), dos álcalis, dos ácidos diluídos, e de muitos compostos orgânicos e de muitos outros fluidos corrosivos (Telles, 2001).

3.8 Parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas

Segundo von Sperling (1996), é possível representar a qualidade da água por meio de diversos parâmetros, estes, por sua vez, expõem as características físicas, químicas e biológicas principais.

A hidroquímica das águas subterrâneas pode ser influenciada por alguns fatores, dentre eles, as condições geológicas e físicas do intemperismo e as reações decorrentes, fatores naturais que se relacionam com o clima, o meio de circulação, a mistura das águas advindas de diferentes matrizes e interferência antrópica (Almeida, 2016).

A Resolução CONAMA nº396 de 2008 no artigo 12, determina que no mínimo três parâmetros essenciais devem ser selecionados, sendo eles, Sólidos Totais Dissolvidos (STD), nitrato e coliformes termotolerantes. No artigo 13, a resolução cita alguns outros parâmetros a serem analisados com base no artigo 12, como pH, turbidez, condutividade elétrica e medição de nível de água (Brasil, 2008).

Para a realização deste estudo foram selecionados os parâmetros físico-químicos pH, Condutividade, Ferro Total, Cobre Total.

3.8.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH pode ser definido como o logaritmo com sinal negativo da concentração de íons H^+ , ou como o logaritmo do inverso da concentração de íons H^+ . Foi estabelecido em 1909 pelo bioquímico S. P. L. Sørensen o termo pH, que definiu como o “expoente do íon hidrogênio”. A acidez ou a alcalinidade de uma determinada solução é descrita através do pH, de modo geral, os valores de pH abrangem uma faixa de 0 a 14. Se a concentração de íons H^+ for maior que a concentração de íons OH^- , ou seja, $[H^+] > [OH^-]$, então, dentro da faixa estabelecida, a solução terá valor menor que 7 e por isso, será ácida. Por outro lado, se a concentração de íons H^+ for menor que a concentração de íons OH^- , ou seja, $[H^+] < [OH^-]$, a solução expressará um valor maior que 7, e assim, será básica, conforme expresso na Figura 5 (Harris, 2017; Vogel, 1981).

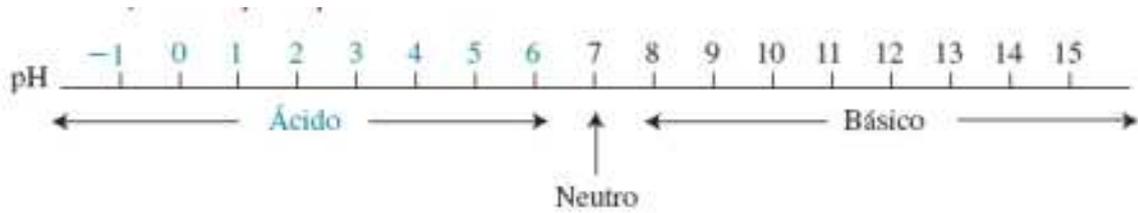
Foi introduzido com a relação expressa na Equação 18:

$$pH = -\log[H^+] = \log \frac{1}{[H^+]} \quad (18)$$

Ou pode ser dado também pela Equação 19:

$$[H^+] = 10^{-pH} \quad (19)$$

Figura 5 - Escala de pH



FONTE: Harris (2017)

Valores baixos de pH podem significar uma maior tendência de corrosividade e agressividade, já níveis de pH elevado, podem resultar uma maior tendência de incrustações, nas águas de abastecimento (von Sperling, 1996).

A resolução CONAMA nº357 de 2005 institui uma faixa de pH aceitável no para águas doces de 6,0 a 9,0.

3.8.2 Condutividade

Condutividade é a determinação numérica da propriedade que certa água possui de transportar corrente elétrica. Este parâmetro é dependente da temperatura e das concentrações iônicas, além de apontar a quantidade de sais presentes na coluna d'água, logo, indica indiretamente a concentração de poluentes. O valor de condutividade da água cresce a proporção que mais sólidos dissolvidos são incorporados. Quando há valores elevados de condutividade, há também a indicação de características corrosivas da água. De modo geral, valores maiores a $100 \mu\text{S cm}^{-1}$ apontam ambientes impactados (CETESB, 2022).

3.8.3 Ferro total

Se trata de um parâmetro químico inorgânico, que quando presente na água, e a depender do teor, confere a água uma coloração amarelada e turva, além de um sabor amargo. Em águas subterrâneas, com baixo pH, na ausência de oxigênio dissolvido e farto em gás carbônico, se encontra na forma de bicarbonato ferroso dissolvido (Klafke, 2023; von Sperling, 1996).

Um dos problemas de teores consideráveis de ferro em águas, se dá pelo problema de gerar depósitos em canalizações, além de ferro-bactérias, o que acarreta contaminação biológica da água em redes de distribuição (CETESB, 2022).

A Resolução CONAMA nº396 de 2008 institui os limites apropriados de ferro em águas subterrâneas. Para recreação, o limite é de $0,3 \text{ mg L}^{-1}$, para irrigação, o limite é de 5 mg L^{-1} , já para o consumo humano, o limite é de $0,3 \text{ mg L}^{-1}$ (Brasil, 2008).

3.8.4 Cobre total

No meio ambiente as fontes de cobre podem incluir as minas de cobre ou de outros metais, da corrosão de tubulações de latão causada por águas ácidas, escoamento superficial e contaminação de águas subterrâneas por conta do uso agrícola do cobre e da precipitação atmosférica advindas da indústria. O cobre quando encontrado na água com teor acima de $2,5 \text{ mg L}^{-1}$, promove sabor amargo; concentração de cobre de 20 mg L^{-1} ou com teor total diário de 100 mg L^{-1} , produz intoxicações ao homem. Já para os peixes, doses altas de cobre são imensamente nocivas (CETESB, 2022).

A Resolução CONAMA nº396 de 2008 estabelece os limites indicados de cobre em águas subterrâneas. Para recreação, o limite é de 1 mg L^{-1} , para irrigação, o limite é de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$, para o consumo de animais, o limite é de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$, já para o consumo humano, o limite é de 2 mg L^{-1} (Brasil, 2008).

4. METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Química Ambiental (LQA) do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEQ). Assim como no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) e no Laboratório de Processos Oxidativos Avançados (LabPOA), localizados na Universidade Federal do Ceará (UFC).

As amostras estudadas foram colhidas em seis pontos de águas subterrâneas de municípios do estado do Ceará. As coletas foram feitas seguindo o Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas conforme descreveu a da Agência Nacional de Águas (ANA, 2011).

As análises dos parâmetros físico-químicos pH, Condutividade, Cobre e Ferro Total, foram realizadas conforme os procedimentos relatados no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater segundo descreveu a American Public Health Association (APHA, 2012).

As análises gravimétricas para determinar a taxa de corrosão, foram efetuadas em concordância com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) baseado na NBR 6210 de 11/2008, que descreve como deve ser realizado o preparo, a limpeza e a determinação da taxa de corrosão dos CP's em ensaios de corrosão, onde, os CP's utilizados foram o aço carbono SAE-AISI 1020 e Cobre (ABNT, 2008).

As seis amostras de água dos pontos coletados foram denominadas de A, B, C, D, E e F, e distribuídas em 12 erlenmeyers, onde, deixaram-se os CP's em exposição nas amostras de água por um período de 35 dias (840 horas).

As morfologias dos CP's antes e após o período de exposição nos ensaios eletroquímicos foram determinadas através de Microscópio Ótica (MO), utilizando o microscópio ótico Leica modelo DMI 3000M.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em potenciostato/ galvanostato modelo PGSTAT30, Autolab, Metrohm-Eco Chemie, e com obtenção dos dados utilizando o Software Nova v.2.1.7.

No presente trabalho, os CP's e as amostras foram identificados conforme expresso na Tabela 6:

Tabela 6 – Legenda adotada das amostras e dos CP's

AMOSTRA	AÇO - CARBONO	COBRE
A	AA	AC
B	BA	BC
C	CA	CC
D	DA	DC
E	EA	EC
F	FA	FC

FONTE: Produzida pelo autor (2024)

4.1 Medidas físico-químicas

As medidas físico-químicas eram realizadas a cada 7 dias (168 horas) em cada amostra de água.

4.1.1 Medidas da condutividade

As condutividades foram determinadas utilizando o condutivímetro de bancada Digimed DM-3P. Antes de cada leitura, calibrava-se o equipamento utilizando uma solução de 1412 μS de concentração. O diafragma do equipamento era imerso na amostra, e o valor de condutividade era registrado no visor do condutivímetro. Antes e após de cada leitura, o eletrodo era lavado com água destilada.

4.1.2 Medidas do pH

Para a determinação do pH das amostras, utilizou-se o pHmetro de bancada Logen Scientific® de modelo LS300. O equipamento era calibrado com as soluções tampão de pH 4,0 e 7,0, conforme instrui o fabricante.

O eletrodo era lavado com água destilada antes e após de cada leitura, em seguida era imerso na solução amostra. Após imerso, a estabilização era esperada e o resultado do pH era visualizado no pHmetro.

4.1.3 Medidas da concentração de Fe^{2+}

Para determinação da concentração de ferro na amostra, utilizou-se o espectrofotômetro Thermo Fischer Scientific® modelo Orion® Aquamate 9000 com comprimento de onda de 510 nm. O valor foi registrado em ppm, o que equivale a mg L^{-1} .

4.1.4 Medidas da concentração de Cu^{2+}

A concentração de cobre foi determinada através de absorção atômica. O equipamento utilizado foi absorção atômica de chama (FAAS) em um modelo Varian SpectrAA 220FS.

Para a determinação, as amostras foram previamente acidificadas com uma solução de 0,3 mL de ácido nítrico 1%. Em seguida, as leituras foram realizadas.

4.2 Determinação da taxa de corrosão

A taxa de corrosão foi determinada através do método gravimétrico de perda de massa. Os CP's utilizados possuíam duas categorias, aço carbono SAE-AISI 1020 e cobre.

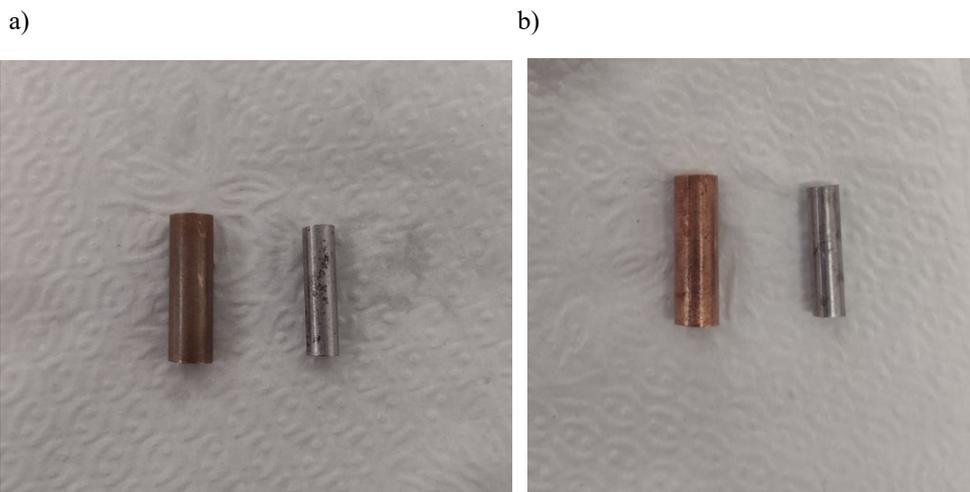
4.2.1 Preparação dos CP's

As limpezas dos CP's de aço-carbono foram realizadas imergindo os metais em um frasco contendo uma solução de Clacke a temperatura ambiente. Os metais eram mantidos imersos durante 30 segundos, pois era tempo suficiente para remover todos os produtos presentes na superfície do material. Após isso, foram lavados com água, e secos utilizando um soprador térmico. Por fim, os CP's foram pesados em balança de precisão e os valores registrados.

Para os CP's de cobre, o mesmo procedimento foi adotado, com exceção da solução de limpeza utilizada no caso do cobre, que consistiu em uma solução de ácido sulfúrico 10%.

Na Figura 6, é possível observar um exemplo dos aspectos dos CP's antes e após a limpeza.

Figura 6 - Corpos de prova utilizados na pesquisa: a) Antes da lavagem; b) Depois da lavagem.



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

4.2.2 Imersão dos CP's nas amostras

Para os ensaios de perda de massa, 12 erlenmeyers foram limpos e identificados. Após isso, uma alíquota de aproximadamente 200 mL de cada amostra foi adicionada nos erlenmeyers. Os ensaios de perda de massa foram realizados com os CP's em triplicatas em cada erlenmeyers, com o objetivo de aumentar o nível de confiança dos resultados.

Os materiais foram presos com um fio de nylon e presos nos erlenmeyers de forma que, em 6 erlenmeyers continham os CP's de aço carbono, e em 6 erlenmeyers continham os CP's de cobre. Como observado na Figura 7.

Figura 7 - CP's imersos com tempo $t(h) = 0$



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

4.3 Métodos eletroquímicos

Os ensaios foram realizados em triplicatas, utilizando uma célula com um sistema de três eletrodos: eletrodo de trabalho, onde foram usados os CP's de aço carbono e cobre; eletrodo de referência de prata/cloreto de prata com $\text{KCl } 3 \text{ mol L}^{-1}$ saturado ($\text{Ag} / \text{AgCl} (\text{KCl } 3 \text{ M Sat})$); e um contra-eletrodo de platina (Pt). Os eletrólitos utilizados foram as amostras de águas estudadas.

Para que houvesse a estabilização da superfície do eletrodo de trabalho, cada sistema era imerso no eletrólito estudado por um período de 3600 s. Com isso, era obtido o OCP. A polarização era realizada de -250 a 250 mV em relação ao OCP a uma velocidade de $1,0 \text{ mV s}^{-1}$, havia a interrupção automática dos ensaios quando a densidade de corrente ultrapassava o valor de $1,0 \text{ mA/cm}^2$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 8, apresenta o aspecto das amostras expostas nas águas subterrâneas por um período de 35 dias (840 horas).

Figura 8 - CP's imersos com tempo de 35 dias (840 h)



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Após o tempo de exposição, é possível observar na Figura 9 o seguinte aspecto dos CP's de cobre.

Figura 9 - CP's de Cobre após exposição de 35 dias (840 h)



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Por outro lado, os CP's de aço carbono após o tempo de exposição, além de apresentarem coloração escurecida, manifestaram a formação de produtos de corrosão na superfície do metal e nas soluções amostras, assim como uma coloração amarelada nas soluções, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - CP's de Aço carbono após exposição de 35 dias (840 h)



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Após a limpeza dos materiais a base de aço carbono, foi possível notar um precipitado de cor castanho-avermelhado, o que é característica de óxidos de ferro presentes em soluções, como é exibido na Figura 11.

Figura 11 - Produto de corrosão de aço carbono



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

5.1 Parâmetros físico-químicos analisados

As Tabelas 7 e 8 mostram os resultados das análises de Ferro Total e Cobre Total nas amostras expostas em aço-carbono e em cobre ao longo do período de exposição, respectivamente:

Tabela 7 - Concentração de Ferro Total nos CP's de aço-carbono ao longo dos dias

AÇO CARBONO						
AMOSTRA DE ÁGUA	TEMPO DE IMERSÃO (d)					
	0	7	14	21	28	35
CONCENTRAÇÃO DE ÍONS FERRO (ppm)						
A	0,2	1,846	3,299	2,951	3,817	4,001
B	0,2	1,627	1,035	2,204	1,134	0,801
C	0,1	0,318	0,208	1,064	0,308	0,333
D	0,6	0,552	1,000	0,890	0,572	0,631
E	0,2	0,273	0,273	0,328	0,388	0,253
F	0,6	0,88	0,417	0,552	0,263	0,288

FONTE: Produzida pelo autor (2024)

(CASAS DECIMAIS)

Tabela 8 - Concentração de Cobre Total nos CP's de cobre ao longo dos dias

COBRE						
AMOSTRA DE ÁGUA	TEMPO DE IMERSÃO (d)					
	0	7	14	21	28	35
CONCENTRAÇÃO DE ÍONS COBRE (ppm)						
A	< 0,01	1,199	1,006	0,892	0,803	0,892
B	< 0,01	0,028	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
C	< 0,01	0,064	0,067	0,081	0,04	0,029
D	< 0,01	0,016	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
E	< 0,01	0,037	0,065	0,105	0,033	0,038
F	< 0,01	0,032	0,018	0,023	< 0,01	< 0,01

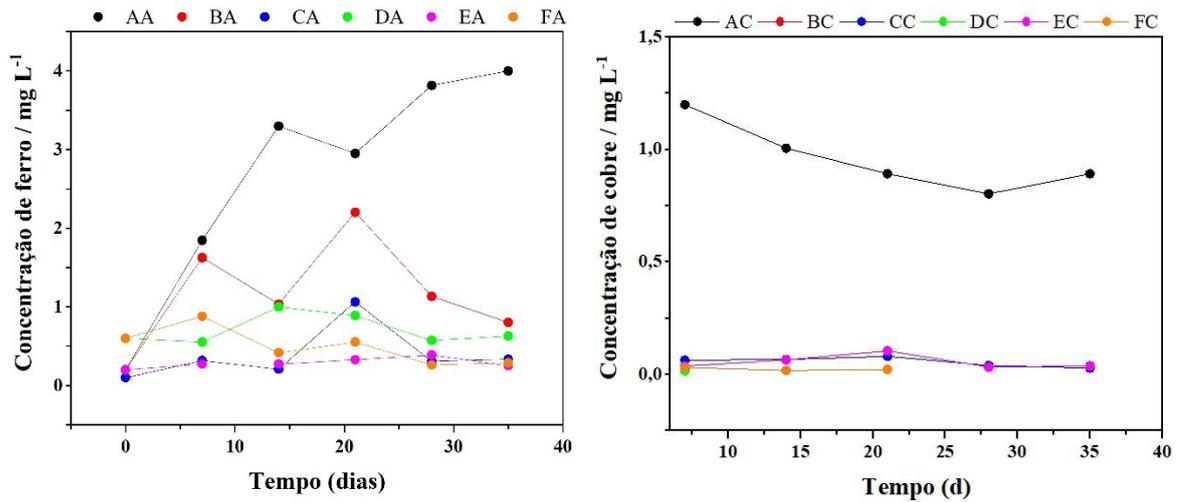
FONTE: Produzida pelo autor (2024)

A partir da tabela de concentração de ferro e da concentração de cobre, os gráficos de Concentração de Ferro Total e de Cobre Total versus tempo (dias) foram obtidos, conforme ilustra a Figura 12:

Figura 12 - Gráficos de a) Concentração de Ferro Total versus tempo (dias) e b) Concentração de Cobre Total versus tempo (dias)

a)

b)



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Na Figura 12 (a), constata-se que a amostra A, dentre todas as demais amostras, apresenta maior concentração de ferro ao longo dos dias, seguido da amostra B. Como já citado anteriormente, dos valores estabelecidos de ferro em águas subterrâneas pela Resolução CONAMA nº396 de 2008, todas as amostras em algum momento apresentaram valores acima do estabelecido para consumo humano e recreação. Na amostra E, apenas nos pontos que indicam 21 e 28 dias, houveram valores acima do estabelecido, e sendo assim, a amostra com menores concentrações de ferro.

Na Figura 12 (b), com base nos valores da resolução, apenas a amostra A, a partir dos 7 dias, apresentou valores acima do estabelecido para recreação, irrigação e consumo de animais. Já as demais amostras de água não indicaram valores que extrapolam dos estipulados.

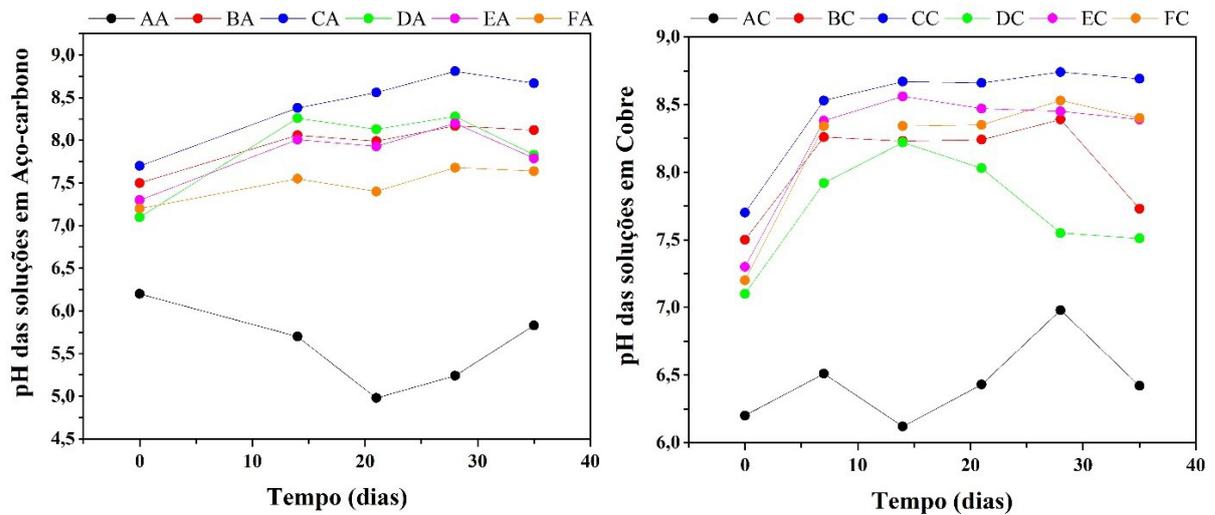
Em ambos os casos, foi possível perceber que ao longo dos dias houve variação na concentração de ferro e cobre nas soluções. A amostra de água A nas duas situações continha maior concentração de íons ferro e cobre. Porém, de modo geral, é perceptível uma maior concentração de ferro nas amostras, nesse caso, o aço carbono obteve maior susceptibilidade a corrosão nesses meios.

Os valores de pH para as soluções em aço-carbono e cobre são descritos na Figura 13:

Figura 13 - Gráfico de pH versus tempo (dias) das soluções expostas nos CP's de a) Aço-carbono e b) Cobre

a)

b)

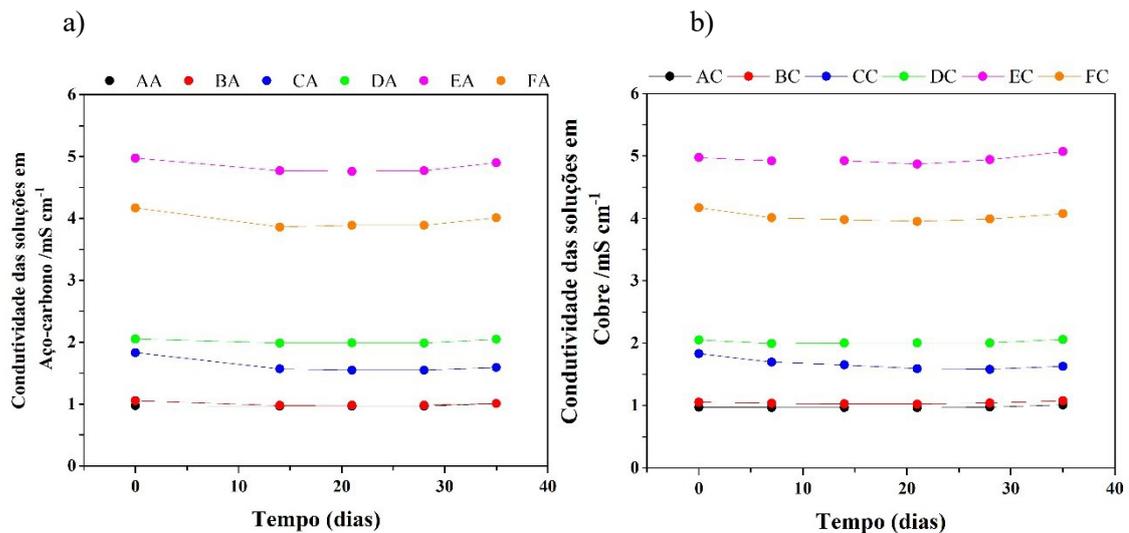


FONTE: Produzida pelo autor (2024)

De acordo com os dados da Figura 14, constatou-se que, com exceção da amostra A em Aço Carbono, as demais amostras de água apresentaram valores aceitáveis de pH dentro dos limites estabelecidos pela legislação. No entanto, mesmo ultrapassar os valores estabelecidos, também é possível observar valores menores de pH na amostra A em Cobre.

Os valores de Condutividade para as soluções em aço-carbono e cobre são descritos na Figura 14 a seguir:

Figura 14 - Gráfico de Condutividade versus tempo (dias) das soluções expostas nos CP's de a) Aço-carbono e b) Cobre



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Como já mencionado anteriormente, valores de pH mais reduzido podem indicar características mais agressivas e corrosivas, assim como, valores elevados de condutividade

indicam tendências corrosivas das águas. Pois o aumento do teor de sais dissolvidos na amostra ocasiona no aumento da condutividade do meio, e este por sua vez, contribui para a reação de corrosão. Quando em pH baixo, a corrosão é acelerada quando o oxigênio é reduzido na superfície metálica (Vasconcelos; Broseguini, 2013).

Dos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA nº357 de 2005 para o pH, a amostra A em ambos os corpos de prova apresentaram valores abaixo do intervalo definido. A partir da Resolução CONAMA nº396 de 2008, é possível constatar que as amostras B e D inicialmente já apresentavam um valor excedido para consumo humano de teor de ferro, e após 7 dias de imersão as amostras já apresentaram teores mais elevados que o limite permitido para o consumo humano. No caso dos CP's a base de cobre, não houve concentração de cobre maior que o limite excedido pela resolução. Para os valores de condutividade a Resolução não estabelece valores máximos permitidos, porém, condutividades elevadas indicam ambientes impactados (CETESB, 2022).

5.2 Morfologias dos CP's após a exposição nas amostras nos ensaios eletroquímicos

Após a realização dos ensaios eletroquímicos dos CP's nas amostras de águas subterrâneas, as amostras foram limpas e, em seguida, a análise das morfologias dos materiais metálicos foi realizada e comparada com as morfologias antes das exposições nas amostras de águas subterrâneas.

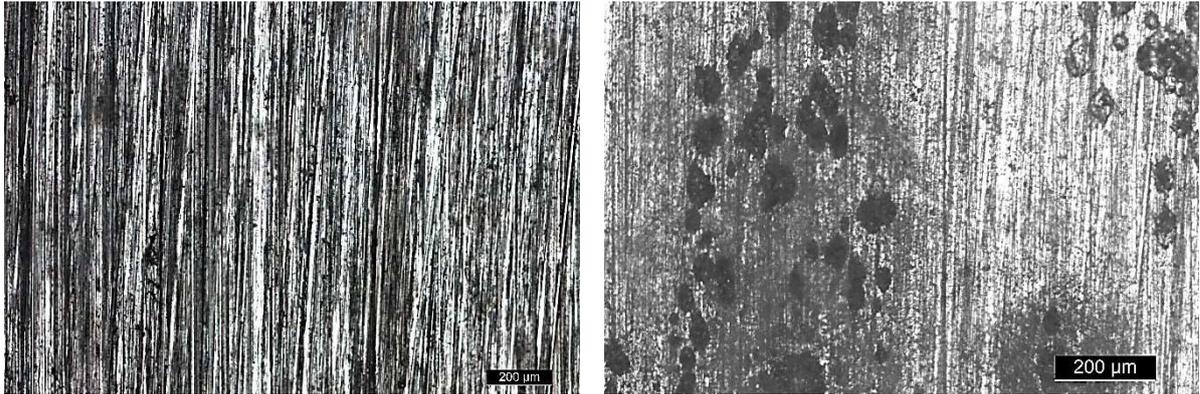
5.2.1 Morfologias dos Corpos de Prova de Aço-carbono

As figuras a seguir, mostram as morfologias dos CP's de aço-carbono antes e depois da exposição nas amostras de águas subterrâneas durante os ensaios eletroquímicos.

Figura 15 - Imagens de MO dos CP's AA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100

a)

b)

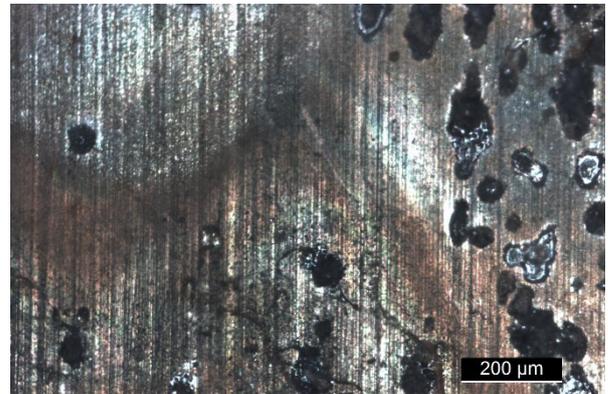
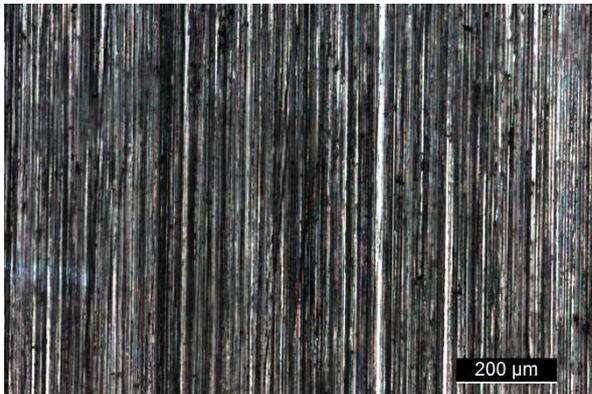


FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Figura 16 - Imagens de MO dos CP's BA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100

a)

b)

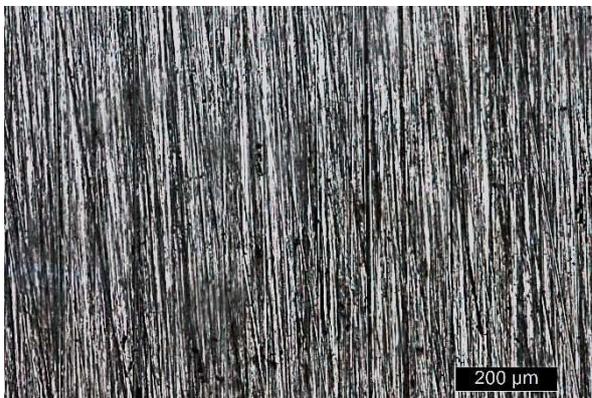


FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Figura 17 - Imagens de MO dos CP's CA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100

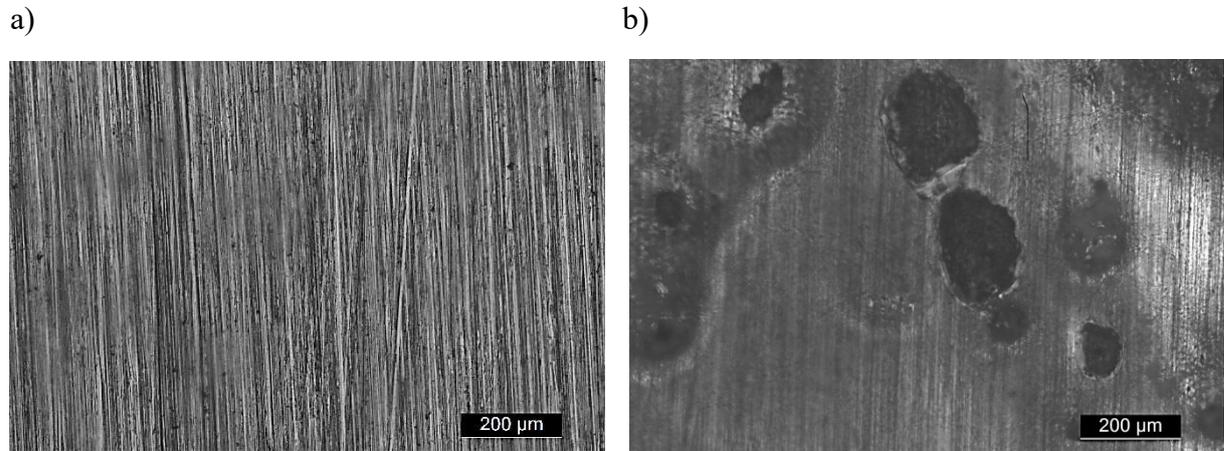
a)

b)



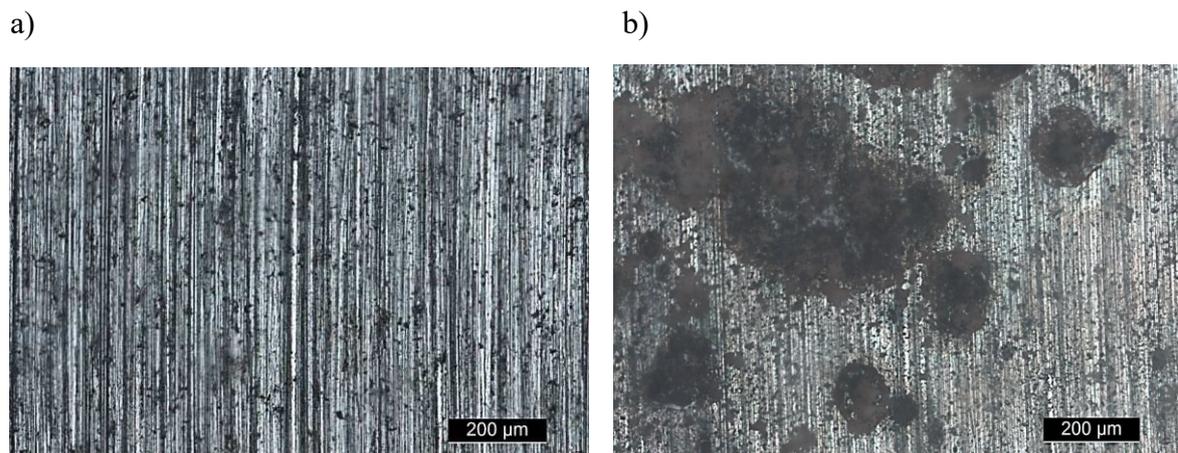
FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Figura 18 - Imagens de MO dos CP's DA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100



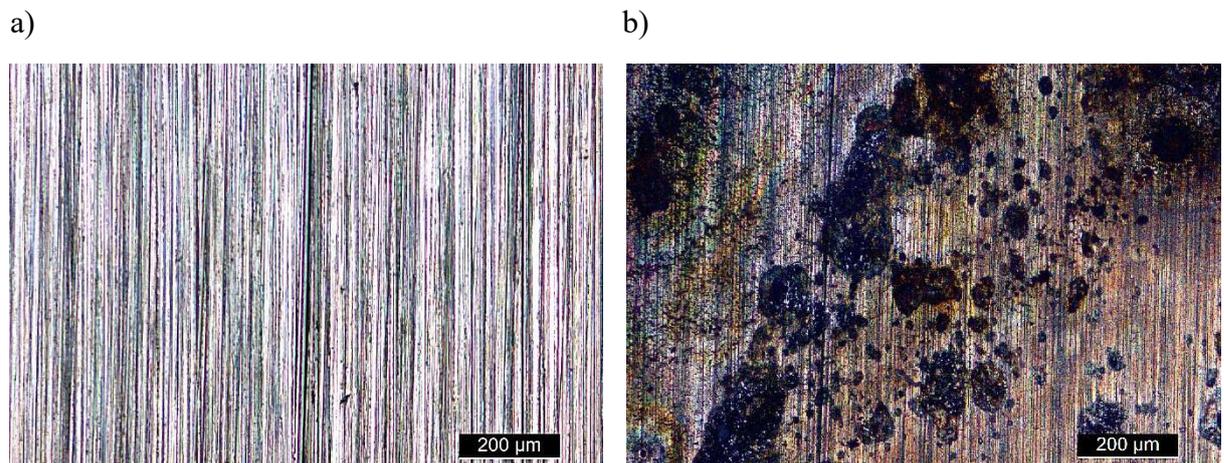
FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Figura 19 - Imagens de MO dos CP's EA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Figura 20 - Imagens de MO dos CP's FA, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100



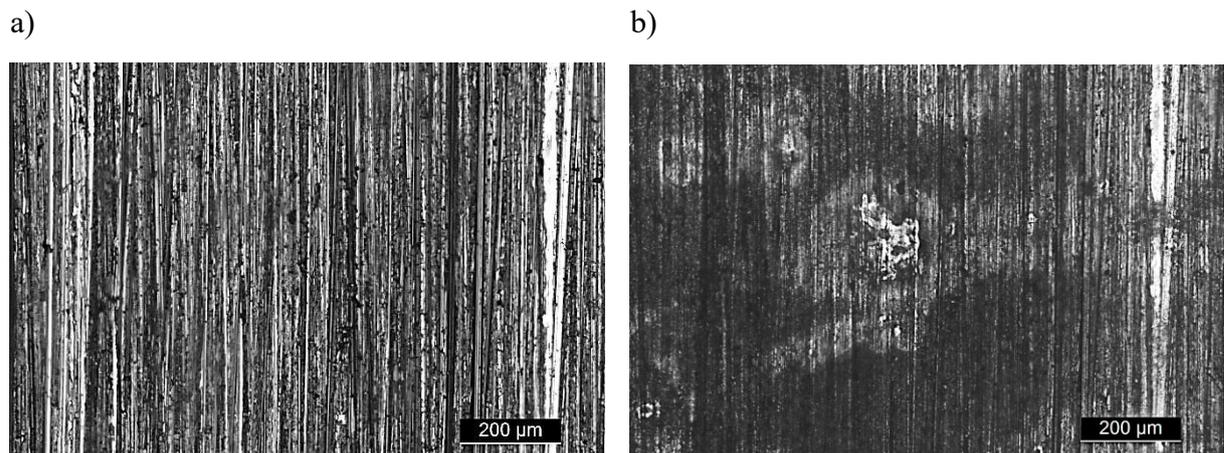
FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Observa-se nas amostras de aço carbono, ataques intensificados a superfície metálica com a morfologia alveolar. Dessa forma, as águas em aço carbono possuem caráter mais agressivo.

5.2.2 *Morfologias dos Corpos de Prova de Cobre*

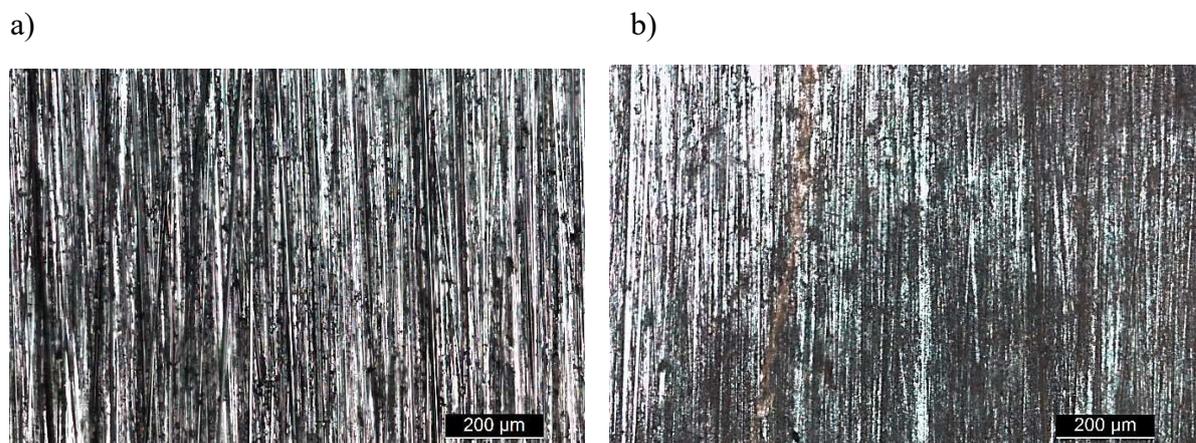
As figuras a seguir, mostram as morfologias dos CP's de cobre antes e depois da exposição nas amostras de águas subterrâneas durante os ensaios eletroquímicos.

Figura 21 - Imagens de MO dos CP's AC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100



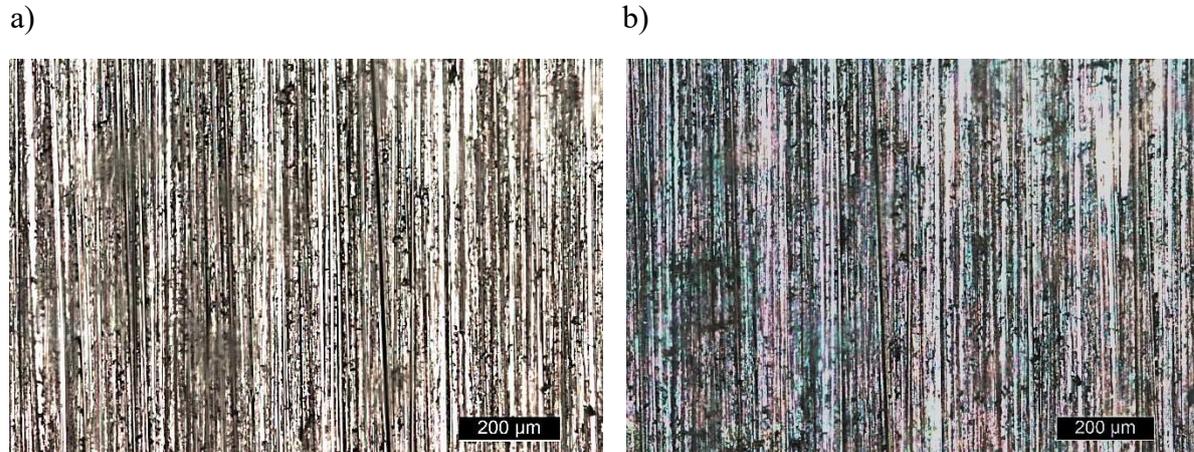
FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Figura 22 - Imagens de MO dos CP's BC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100 c) antes da exposição nas amostras com ampliação de x200 d) após exposição com ampliação de x200



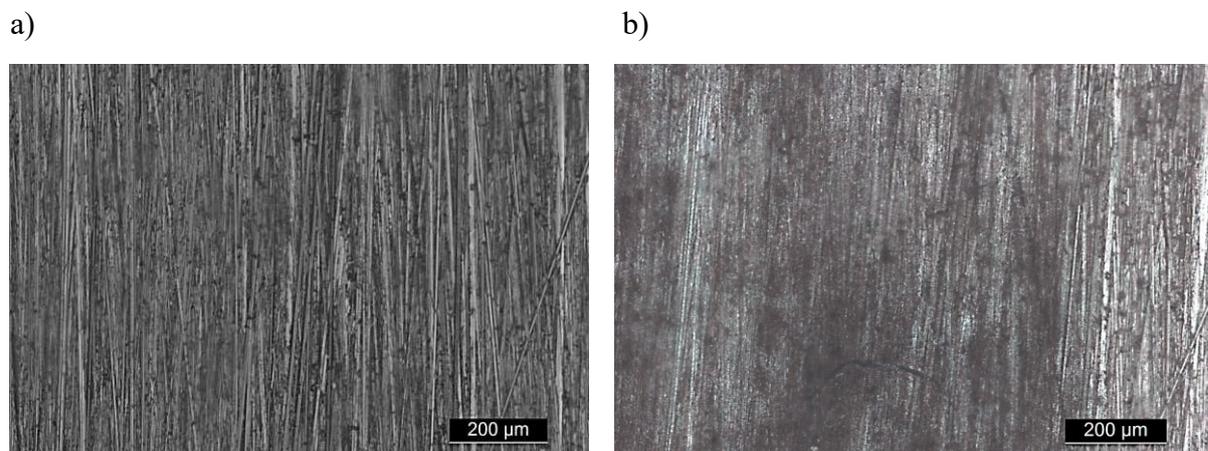
FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Figura 23 - Imagens de MO dos CP's CC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100 c) antes da exposição nas amostras com ampliação de x200 d) após exposição com ampliação de x200



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

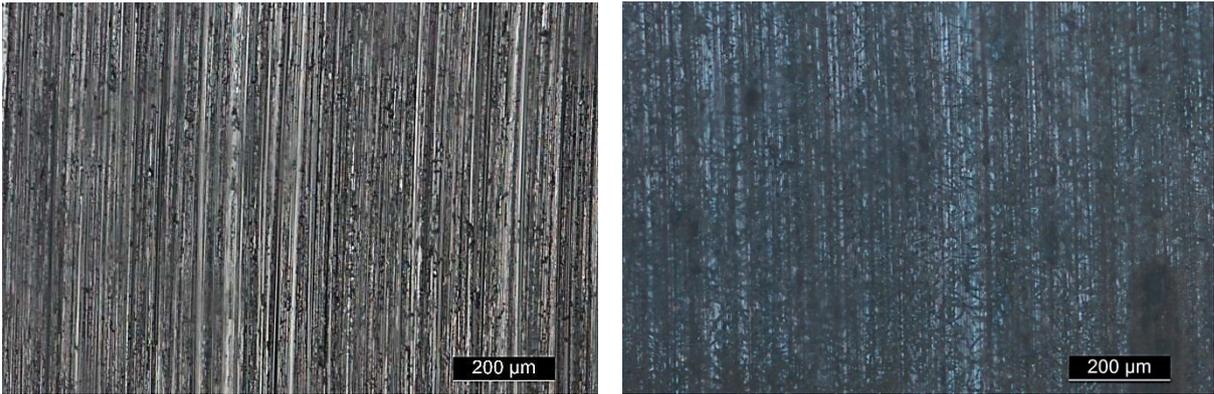
Figura 24 - Imagens de MO dos CP's DC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100 c) antes da exposição nas amostras com ampliação de x200 d) após exposição com ampliação de x200



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Figura 25 - Imagens de MO dos CP's EC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100 c) antes da exposição nas amostras com ampliação de x200 d) após exposição com ampliação de x200



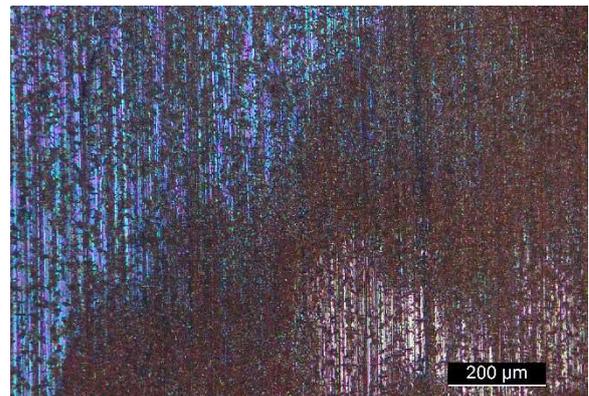


FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Figura 26 - Imagens de MO dos CP's FC, onde a) antes da exposição nas amostras com ampliação de x100 b) após exposição com ampliação de x100 c) antes da exposição nas amostras com ampliação de x200 d) após exposição com ampliação de x200

a)

b)



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Nos CP's a base de cobre, é possível observar que existem ataques corrosivos, porém, a superfície metálica é atacada de modo mais brando.

5.3 Taxa de corrosão por perda de massa

Após os CP's serem expostos às amostras de água, foram limpos conforme indica as normas e foram novamente pesados para que seja possível a determinação da perda de massa durante o período de exposição.

A partir disso, e de posse dos valores de área dos CP's, os valores da taxa de corrosão foram determinados.

5.3.1 Resultados em Aço-carbono

A partir dos valores das massas iniciais e finais das triplicatas dos CP's de aço-carbono, e utilizando a equação da taxa de corrosão conforme foi definido pela ABNT por meio da NBR 6210 de 11/2008, é possível observar as taxas de corrosão dos CP's de Aço-carbono nas amostras de água na Tabela 9:

Tabela 9 - Taxa de corrosão dos CP's de Aço-carbono

AMOSTRA DE ÁGUA	ÇO CARBONO
	TAXA DE CORROSÃO (mm/ano)
A	$0,1031 \pm 0,0146$
B	$0,1145 \pm 0,0073$
C	$0,0925 \pm 0,0029$
D	$0,1124 \pm 0,0071$
E	$0,1011 \pm 0,0043$
F	$0,0906 \pm 0,0031$

FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Verifica-se que o CP de aço carbono exposto na amostra B, apresentou uma maior taxa de corrosão, seguido do CP exposto na amostra D e amostra A. Logo, é possível observar na amostra B uma maior característica corrosiva para aço-carbono.

5.3.2 Resultados em Cobre

A partir dos valores das massas iniciais e finais das triplicatas dos CP's de cobre e de forma análoga ao do Aço-carbono, a taxa de corrosão obtida é expressa na Tabela 10:

Tabela 10 - Taxa de corrosão dos CP's de Cobre

AMOSTRA DE ÁGUA	OBRE
	TAXA DE CORROSÃO (mm/ano)
A	$0,0125 \pm 0,0003$
B	$0,0011 \pm 0,0002$
C	$0,0016 \pm 0,0003$
D	$0,0033 \pm 0,0004$
E	$0,0045 \pm 0,0002$
F	$0,0057 \pm 0,0001$

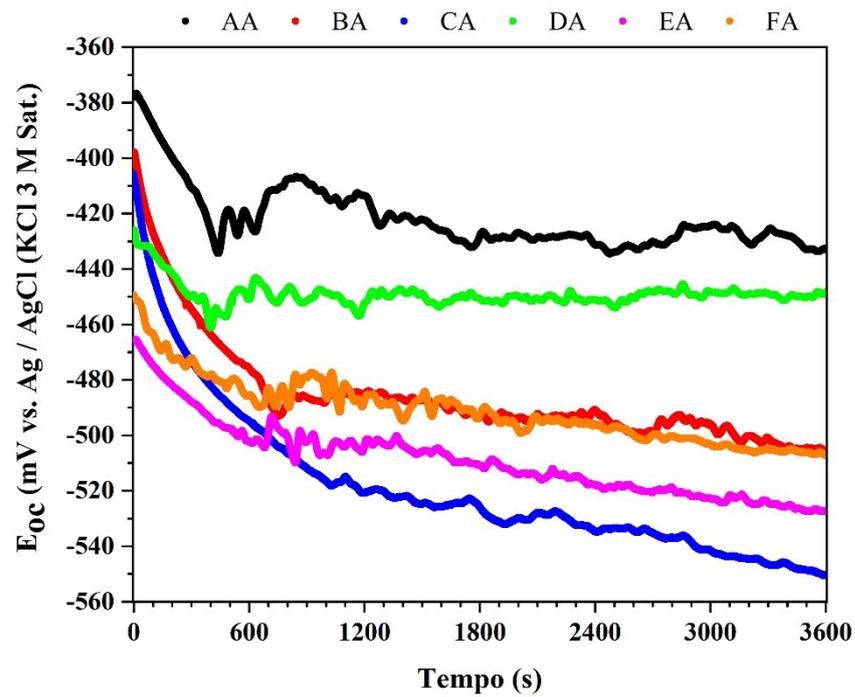
FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Na amostra de água A, o CP de cobre apresentou maior taxa de corrosão, seguido, da amostra E e F. Por outro lado, a amostra de B apresentou uma menor taxa de corrosão, comportamento oposto ao observado em aço-carbono.

5.4 Ensaios eletroquímicos

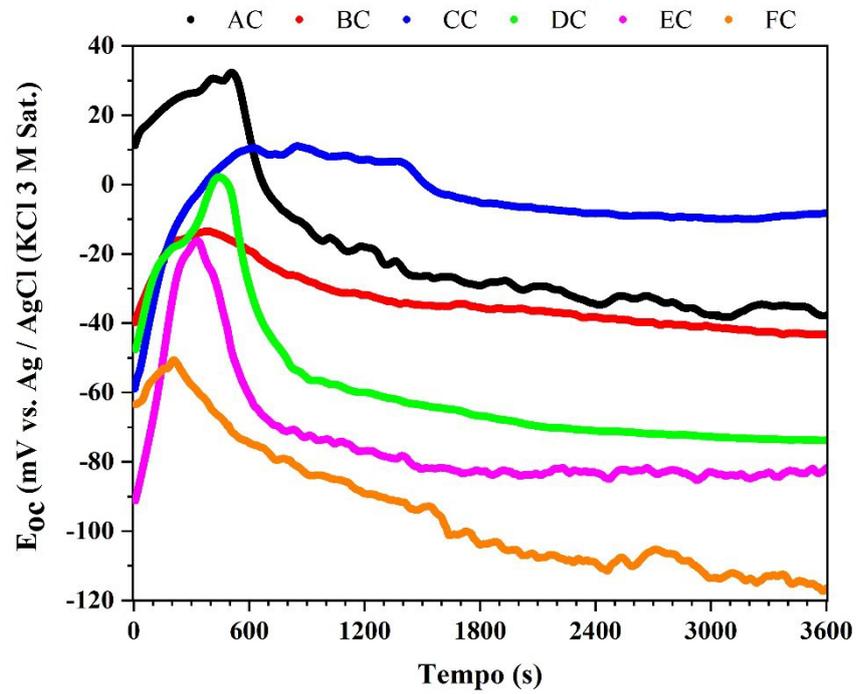
Os ensaios eletroquímicos foram realizados e foram obtidas as curvas de polarização, assim como os gráficos de variação de Potencial de Circuito Aberto (OCP) *versus* tempo (s), conforme ilustram as Figuras 27 e 28.

Figura 27 - Variação do OCP versus tempo (segundos) das amostras de água em Aço-carbono



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

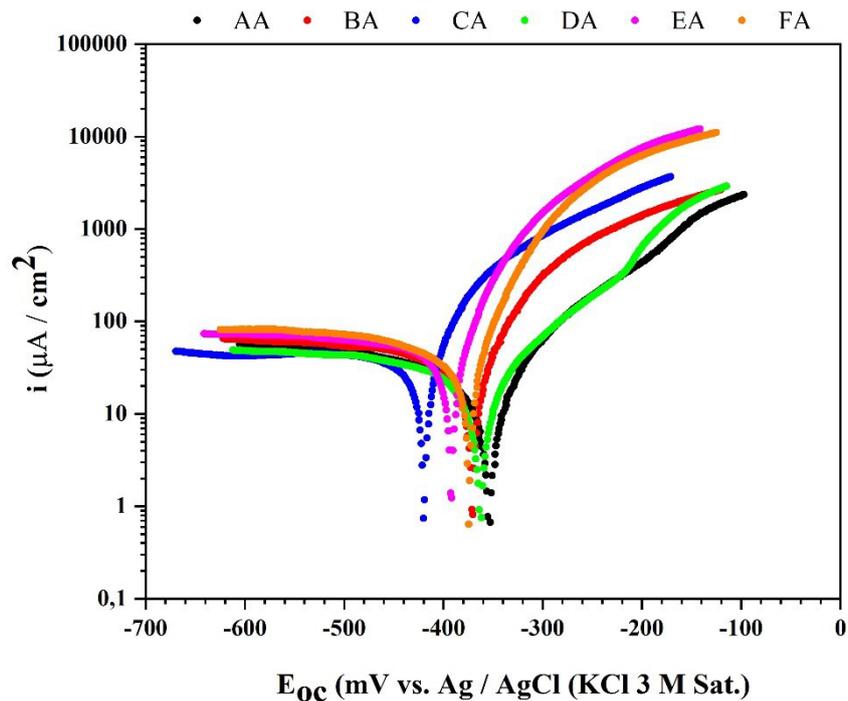
Figura 28 - Variação do OCP versus tempo (s) das amostras de água em Cobre



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

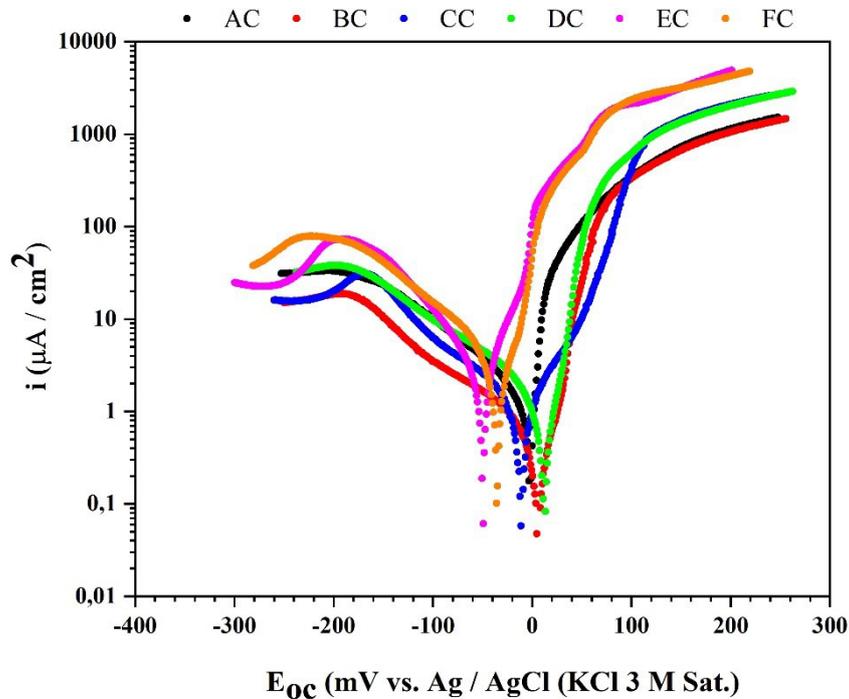
As curvas de polarização obtidas foram expressas nas Figuras 29 e 30:

Figura 29 - Curvas de polarização linear potenciodinâmica nas amostras de águas subterrâneas em Aço-carbono



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Figura 30 - Curvas de polarização linear potenciodinâmica nas amostras de águas subterrâneas em Aço-carbono



FONTE: Produzida pelo autor (2024)

A partir das curvas, foi possível obter a Tabela 12 com os seguintes parâmetros eletroquímicos:

Tabela 12 - Parâmetros eletroquímicos obtidos nas curvas de polarização

Água	Aço Carbono		Cobre	
	E_{corr} (mV)	R_p ($k\Omega \cdot cm^2$)	E_{corr} (mV)	R_p ($k\Omega \cdot cm^2$)
A	$-386,7 \pm 30,6$	$1,82 \pm 0,05$	$-21,0 \pm 2,90$	$4,83 \pm 0,50$
B	$-383,3 \pm 23,1$	$0,94 \pm 0,09$	$4,80 \pm 0,20$	$12,7 \pm 2,35$
C	$-403,3 \pm 15,3$	$0,60 \pm 0,12$	$-18,3 \pm 3,00$	$13,6 \pm 2,19$
D	$-360,0 \pm 10,0$	$1,10 \pm 0,11$	$11,2 \pm 0,10$	$5,93 \pm 0,37$
E	$-413,3 \pm 32,1$	$0,52 \pm 0,05$	$-51,4 \pm 0,70$	$4,89 \pm 0,56$
F	$-403,3 \pm 40,4$	$0,64 \pm 0,07$	$32,0 \pm 2,20$	$5,13 \pm 0,43$

FONTE: Produzida pelo autor (2024)

Onde:

Ecorr: Potencial de corrosão

Rp: Resistência a polarização

É possível observar que, quando as amostras estavam em aço carbono, os potenciais apresentaram valores mais negativos ao se comparar quando estavam na presença de cobre. De acordo com Souza *et al.* (2005), valores de potenciais mais positivos indicam uma inibição de processos anódicos, ou seja, inibição de processos oxidativos na superfície metálica, logo, apontam, maior resistência a corrosão.

6 CONCLUSÃO

A partir dos estudos de taxa de corrosões realizadas pelo método gravimétrico de perda de massa, a partir dos estudos eletroquímicos, e com base nos valores de corrosividade informados anteriormente na Tabela 9, constatou que pelo método gravimétrico, em aço carbono, as amostras aço tiveram resultados moderadamente corrosivos. Já em cobre, o comportamento do material expressou baixa corrosão. Nos ensaios eletroquímicos, em aço carbono verificou-se que os CP's exposto nas amostras de águas apresentaram valores menores de Rp, ou seja, possuem menor resistência a corrosão. Aliado a isso, a partir dos resultados obtidos de OCP, foi possível concluir que os CP's de Aço Carbono se mostraram mais susceptíveis a corrosão em contato com as amostras de águas subterrâneas, e os CP's de Cobre tiveram valores mais positivos de potencial, ou seja, mais resistentes a corrosão diante das amostras de águas.

Ao analisar os parâmetros físico-químicos, foi possível observar que a amostra A em ambos os CP's resultaram em valores menores de pH. Em ambos os CP's, as amostras E e F apresentaram maior valor de condutividade, variando de 4 mS cm⁻¹ a 5 mS cm⁻¹, enquanto as amostras A obtiveram menor valor, girando em torno de 1 mS cm⁻¹.

Diante das morfologias, observou-se que em Aço Carbono, a corrosão ocorrida se deu de modo mais significativo, em comparação com os CP's de Cobre.

As águas em contato com o Aço Carbono se mostraram mais agressivas, análogo a isso, é possível observar um aumento do teor de ferro dessas amostras.

Os ensaios gravimétricos de perda de massa resultaram em taxas de corrosão variando de $0,0803 \text{ mm ano}^{-1}$ a $0,101 \text{ mm ano}^{-1}$ para aço-carbono, e $0,0010 \text{ mm ano}^{-1}$ a $0,0108 \text{ mm ano}^{-1}$ para cobre. Com base nisso, foi possível constatar que as águas subterrâneas apresentaram caráter corrosivo moderado em contato com o Aço Carbono, com aumento do teor de ferro no meio líquido. Ao passo que, em Cobre foi apresentado uma baixa corrosividade, no entanto, com pequenos incrementos de teores de cobre no meio líquido.

Com isso, é possível afirmar que de maneira análoga a determinada por Kellner e Oliveira (2022), os materiais metálicos de cobre demonstraram menor tendência a corrosividade, além de observar um aumento no teor de íons de cobre nas amostras de água expostas ao cobre.

Outrossim, assim como Kalyani et al (2017), uma maior agressividade nos materiais de aço-carbono foi detectada, pois, este apresentou maiores valores de taxa de corrosão e com isso, foi o material mais com menor resistência a corrosão frente as amostras de águas subterrâneas.

Tal estudo, representa um passo inicial na compreensão dos efeitos da corrosividade causada pelas águas subterrâneas, pois existe ainda uma vasta gama de possibilidades a serem exploradas. Outras análises podem ser conduzidas ampliando a pesquisa com o objetivo de incluir outros tipos de águas, como por exemplo as águas dos rios, que também podem possuir características corrosivas específicas. Portanto, futuros trabalhos contribuirão para estratégias mais eficazes na prevenção da corrosão e preservação da integridade dos sistemas metálicos expostos as águas subterrâneas e outras fontes de água.

REFERÊNCIAS

ABAS. **Orientações para utilização de águas subterrâneas no estado de São Paulo**. São Paulo: FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, 2005.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6210: Corrosão atmosférica — Materiais metálicos — Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Manual de usos consuntivos da água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019.

ALMEIDA, Luciane Madureira *et al.* CONSERVAÇÃO E MONITORAMENTO AMBIENTAL UTILIZANDO ALLIUM CEPA COMO INDICADORA DE POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS: UMA REVISÃO NARRATIVA. *In: ÁGUAS E FLORESTAS: DESAFIOS PARA CONSERVAÇÃO E UTILIZAÇÃO*. [S. l.]: Editora Científica Digital, 2021. p. 174–191.

ALMEIDA, Leonardo de. **Hidrogeologia Conceitos Básicos**. Brasília: ANA, 2016.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas**. 2. ed. Brasília: ANA, 2011.

APERAM. **Aços Carbono: Especificações, características e aplicações**. [S. l.]: Aperam South America, [s. d.].

APHA, American Public Health Association. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2012.

AZEVEDO, Paula; PEREIRA, Filipe; PAIVA, Sergio. **Água, Hidratação e Saúde**. [S. l.: s. n.], 2016.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Resolução CONAMA nº 396/08**. Disponível em: <<https://portalpnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20396.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2024

BRUNATTO, Silvio Francisco. **INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS AÇOS**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016.

CASTRO, César Nunes de. **Água, problemas complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Rio de Janeiro: Ipea, 2022.

CASTRO, Karen; GONÇALVES, José. Quantificação do potencial hídrico subterrâneo do baixo curso do Rio Piracicaba (MG): Interação das águas subterrâneas e superficiais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Itajubá, v. 15, n. 04, p. 1881–1901, 2022.

CEARÁ. **Boletim Epidemiológico**. [S. l.]: Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano - VIGIÁGUA, 2024.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo | Apêndice C – Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem**. São Paulo: CETESB, 2022.

COSTA, W. M.; NASCIMENTO, R. F.; SILVA, F. J. A. AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE POÇOS PROFUNDOS SITUADOS NO MUNICÍPIO DE CAUCAIA – CE E SUAS LIMITAÇÕES DE USOS. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, México, v. 15, n. 1, p. 299, 2022.

DOOGE, J.C. **Fresh Surface Water**. In: ENCYCLOPEDIA OF LIFE SUPPORT SYSTEMS. Dublin: Eolss Publishers Company Limited, 2009.

FEITOSA, Fernando *et al.* **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2008.

FERREIRA, Luiz Antonio *et al.* **Curso de formação de operadores de refinaria: química aplicada, corrosão**. Curitiba: Equipe Petrobras, 2002.

GEBREMIKAEL, G. H.; DAWOD, A. H. Assessment of Corrosion and Scale forming Potential of Groundwater Resources: Case Study of Dire Dawa City, Ethiopia. **Momona Ethiopian Journal of Science**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 110–133, 2021.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

HARRIS, Daniel C. **Análise Química Quantitativa**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

HILSDORF, Jorge Wilson *et al.* Fundamentos de Corrosão. *In: QUÍMICA TECNOLÓGICA*. 1. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning Ltda, 2004. p. 1–348.

HIRATA, Ricardo *et al.* **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/e7d9e125-7b22-4706-915b-a397f8a91784/2928658.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2024.

JONES, Denny A. **Principles and prevention of corrosion**. 2. ed. Saddle River: Prentice Hall, 1996.

KALYANI, D. S. *et al.* Correlation between corrosion indices and corrosiveness of groundwater: a study with reference to selected areas of Krishna District, Andhra Pradesh, India. **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], v. 76, n. 16, p. 568, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6908-y>. Acesso em: 16 set. 2024

KELLNER, Erich; OLIVEIRA, Felipe Eduardo de Souza. A agressividade da água e a possibilidade de alteração da qualidade para o consumo humano. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, São Carlos, v. 27, n. 1, p. 159–168, 2022.

KLAFKE, Luca Zarte. **Tratamento para remoção de ferro das águas subterrâneas do município de Osório**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023.

LANE, R.W. **Control of Scale and Corrosion in Building Water Systems**. New York: McGraw Hill, 1993.

MATLAKHOV, Anatoliy Nikolaevich. **Corrosão e proteção dos materiais**. 1. ed. Jundiaí, SP: Paco Editorial, 2021.

MESQUITA, André Pina de; KELLNER, Erich. AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE LANGELIER EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SÃO CARLOS (SP), SUPRIDO POR MANANCIAL SUBTERRÂNEO: ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [s. l.], v. 3, n. 14, 2015. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/1031. Acesso em: 16 set. 2024.

MIRANDA, Ricardo; OLIVEIRA, Marcus; SILVA, Danielle. CICLO HIDROLÓGICO PLANETÁRIO: abordagens e Conceitos. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 21, p. 109–119, 2010.

NUNES, Ramom; REZENDE, Maria. O solo: estrutura e composição. *In*: 1. ed. São Carlos: Editora Cubo, 2022. p. 24–38.

PAOLINI, Nicolas Augusto. **Estudos comparativos da proteção contra corrosão de diferentes óleos vegetais encapsulados em microcápsulas de poli(ureia-formaldeído)**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

PAPAVINASAM, Sankara. Electrochemical polarization techniques for corrosion monitoring. *In*: TECHNIQUES FOR CORROSION MONITORING. Carson City: Elsevier, 2021. p. 45–77.

PAREDES, Ramón S. C. **Corrosão e proteção dos materiais**. Curitiba: Departamento de Engenharia Mecânica - UFPR, 2018.

POURBAIX, Marcel; STAEHLE, Roger W. **Lectures on Electrochemical Corrosion**. 1. ed. Boston, MA: Springer US, 1973.

SANTOS, Rebeca Silva; SANTANA, Paulo Moura Bispo de. **Avaliação da taxa de corrosão em sistemas de aço carbono, submetidos à água do poço artesiano que abastece parte da rede hidráulica do IFBA Campus Simões Filho**. Salvador: join, 2019.

SILVA, Jefferson Fernandes do Amaral; PEREIRA, Roberto Guimarães. Panorama global da distribuição e uso de água doce. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 263–280, 2019.

SINGH, Ramesh. **Applied Welding Engineering: Processes, Codes, and Standards**. 3. ed. Waltham: Elsevier, 2020.

SOUZA, Fernanda Stanzani de. **Determinação espectrofotométrica UV-Vis da corrosão do Cobre**. Niterói: Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, 2022.

SOUZA, Amanda R. *et al.* Medidas de potencial de circuito aberto: um experimento para o ensino de Eletroquímica. **Química Nova**, São Paulo, p. 756–760, 2005.

SYEED, M M Mahbubul *et al.* Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review. **Environmental and Sustainability Indicators**, [s. l.], v. 18, p. 100247, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100247>. Acesso em: 15 ago. 2024

TAM, Y. S.; ELEFSINIOTIS, P. Corrosion control in water supply systems: Effect of pH, alkalinity, and orthophosphate on lead and copper leaching from brass plumbing. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, [s. l.], v. 44, n. 12, p. 1251–1260, 2009.

TELLES, Pedro C. Silva. **Tubulações Industriais: Materiais, Projeto, Montagem**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

VASCONCELOS, Juliana Silva de; BROSEGUINI, Marianna. **Estudo de caso: corrosão em tubulação de Aço carbono provocada por água doce**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.

VOGEL, Arthur Israel. **Química Analítica Qualitativa**. 5. ed. São Paulo: Mestre Jou, 1981.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 2. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. v. 1