



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

KAUÊ LORENZO BARBOSA XIMENES

**CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DE RISERS FLEXÍVEIS EM ÁGUA DO
MAR SINTÉTICA: INFLUÊNCIA DO CO₂**

FORTALEZA

2026

KAUÊ LOURENZO BARBOSA XIMENES

CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DE RISERS FLEXÍVEIS EM ÁGUA DO MAR
SINTÉTICA: INFLUÊNCIA DO CO₂

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo

FORTALEZA

2026

CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DE RISERS FLEXÍVEIS EM ÁGUA DO MAR
SINTÉTICA: INFLUÊNCIA DO CO₂

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 16/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Walney Silva Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Bruno Gomes Linhares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Ana e Antônio.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por me educar, cuidar e me ensinar a ser o homem que sou hoje.

Aos colegas da graduação, pelas experiências que compartilhamos e pelas amizades que forjamos juntos.

À Universidade Federal do Ceará, por ser um espaço de possibilidades e aprendizagem para os estudantes.

Ao Centro Acadêmico de Engenharia Metalúrgica, por ser a primeira instituição da universidade a me acolher e que contribuiu para a minha formação pessoal e profissional.

Aos professores universitários, por todo conhecimento técnico, experiências profissionais e atitudes éticas que me passaram durante esses anos.

Ao Professor Doutor Walney Silva Araújo, pela excelente orientação.

Aos colegas da turma de mestrado e doutorado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão, por me acolher e me apresentar a iniciação científica e o ramo da pesquisa em corrosão.

À CAPES, FUNCAP e ASTEF, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Aos professores participantes da banca examinadora, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

“A educação é uma descoberta progressiva de
nossa própria ignorância” (Voltaire).

RESUMO

O setor de petróleo e gás é responsável por fornecer as principais fontes de energia utilizadas no mundo, movimentando indústrias, transportes, produção de energia, investimentos na infraestrutura e tecnologia, além da geração de milhões de empregos diretos e indiretos. É atualmente um dos setores mais importantes para a economia global e para o desenvolvimento de diversos países. Na exploração de petróleo e gás em águas profundas, os aços carbonos são amplamente utilizados em componentes como os risers flexíveis, dutos multicamadas que conectam as plataformas de produção aos poços submarinos. O alto custo associado à corrosão desses materiais impacta significativamente a indústria, onde o CO₂ é uma das principais causas de degradação. Este estudo avaliou a resistência à corrosão dos aços carbono AISI 1070 e 1075, aplicados na armadura de tração dos risers, em água do mar sintética (ASTM D1141), na ausência e na presença de CO₂. A investigação buscou compreender os efeitos do CO₂ sobre a integridade desses materiais. A metodologia envolveu ensaios eletroquímicos como Potencial de Circuito Aberto (OCP), Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) e Polarização Linear (LPR), além de análises microestruturais por microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram submetidas a ambientes com e sem saturação de CO₂ em condições controladas de temperatura e pH, utilizando uma célula eletroquímica de três eletrodos. Os resultados demonstraram que a presença de CO₂ agravou significativamente os processos corrosivos, com queda acentuada nos valores de resistência à polarização (Rp) e aumento das taxas de corrosão. O aço AISI 1075 apresentou melhor desempenho em todos os testes, sugerindo maior estabilidade de seus filmes protetores. As imagens de MO e MEV são condizentes com esses resultados, revelando maior formação de óxidos e ataque superficial nas amostras expostas ao CO₂. Notou-se ainda um aumento da resistência à corrosão ao longo do tempo, associado à formação de camadas superficiais que limitam a transferência de carga.

Palavras-chave: Aço Carbono; Resistência a Corrosão; Risers Flexíveis.

ABSTRACT

The oil and gas sector is responsible for supplying the main sources of energy used worldwide, driving industries, transportation, energy production, infrastructure and technology investments, and generating millions of direct and indirect jobs. It is currently one of the most important sectors for the global economy and the development of many countries. In deepwater oil and gas exploration, carbon steels are widely used in components such as flexible risers, multilayer pipelines that connect production platforms to subsea wells. The high cost associated with the corrosion of these materials significantly impacts the industry, where CO₂ is one of the main causes of degradation. This study evaluated the corrosion resistance of AISI 1070 and 1075 carbon steels, applied in the tensile armor of risers, in synthetic seawater (ASTM D1141), in the absence and presence of CO₂. The investigation sought to understand the effects of CO₂ on the integrity of these materials. The methodology involved electrochemical tests such as Open Circuit Potential (OCP), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), and Linear Polarization Spectroscopy (LPR), in addition to microstructural analyses by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The samples were subjected to environments with and without CO₂ saturation under controlled temperature and pH conditions, using a three-electrode electrochemical cell. The results demonstrated that the presence of CO₂ significantly aggravated the corrosive processes, with a sharp drop in polarization resistance (R_p) values and an increase in corrosion rates. AISI 1075 steel showed better performance in all tests, suggesting greater stability of its protective films. The OM and SEM images are consistent with these results, revealing greater oxide formation and surface attack in the samples exposed to CO₂. An increase in corrosion resistance over time was also observed, associated with the formation of surface layers that limit load transfer.

Keywords: Carbon Steel; Corrosion Resistance; Flexible Risers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura e aplicação de um Riser Flexível	17
Figura 2 – Seção Transversal da barra.....	27
Figura 3 – Fluxograma de metodologia Experimental.....	28
Figura 4 – Esquemático da célula eletroquímica de três eletrodos.....	29
Figura 5 – Micrografias da seção transversal dos aços a) AISI 1070 a 5000x b) AISI 1070 a 10000x c) AISI 1075 a 5000x d) AISI 1075 a 10000x.....	31
Figura 6 – Monitoramento do OCP, nos aços AISI 1070 e AISI 1075 na ausência (a) e na presença de CO ₂ (b).....	32
Figura 7 – Bode Módulo x Bode Fase, nos aços AISI 1070 e AISI 1075 na ausência (a) e na presença de CO ₂ (b).....	33
Figura 8 – LPR's nos aços AISI 1070 e AISI 1075 na ausência e na presença de CO ₂	34
Figura 9 – Condição da superfície do aço AISI 1070 a) pós-ensaio de impedância na ausência de CO ₂ , b) pós-ensaio de impedância na presença de CO ₂ , c) pós-ensaio de LPR na ausência de CO ₂ , d) pós-ensaio de LPR na presença de CO ₂ e e) pré-ensaio.....	36
Figura 10 – Condição da superfície do aço AISI 1075 a) pós-ensaio de impedância na ausência de CO ₂ , b) pós-ensaio de impedância na presença de CO ₂ , c) pós-ensaio de LPR na ausência de CO ₂ , d) pós-ensaio de LPR na presença de CO ₂ e e) pré-ensaio.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição química dos aços AISI 1070 e 1075 (% em peso).....	28
Tabela 2	– Valores de médios de Rp para os ensaios de EIS dos aços AISI 1074 e 1075, na ausência e presença de CO ₂	34
Tabela 3	– Valores de médios de Rp para os ensaios de LPR dos aços AISI 1070 e 1075, na ausência e presença de CO ₂	35
Tabela 4	– Valores de médios de Taxa de corrosão para os ensaios de LPR dos aços AISI 1070 e 1075, na ausência e presença de CO ₂	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
EIS	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica
LPR	Polarização Linear
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
OCP	Potencial de Circuito Aberto
pH	Potencial Hidrogeniônico
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
→	Direção da reação química
√	Raiz Quadrada
A	Área
B	Constante de Stern-geary
C	Carbono
CaCl ₂	Cloreto de cálcio
cm ²	Centímetro quadrado
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₃ ²⁻	Íon carbonato
CR	Taxa de corrosão
e ⁻	Elétron
EW	peso equivalente do metal
Fe	Ferro
Fe ²⁺	Íon ferroso
FeCO ₃	Carbonato de ferro
g	Gramas
H	Hidrogênio
H ⁺	Íon hidrogênio
H ₂	Gás hidrogênio
H ₂ CO ₃	Ácido carbônico
H ₃ BO ₃	Ácido bórico
HCO ₃ ⁻	Íon bicarbonato
i _{corr}	Densidade de corrente de corrosão
KBr	Brometo de potássio
KCl	Cloreto de potássio
MgCl ₂ ·6H ₂ O	Cloreto de magnésio hexahidratado
mm	Milímetro
mm/ano	Milímetro por ano
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sódio
NaCl	Cloreto de sódio

NaF	Fluoreto de sódio
NaHCO ₃	Bicarbonato de sódio
O	Oxigênio
°C	Graus Celsius
R _p	Resistência a polarização
SrCl ₂	Cloreto de estrôncio
Z	Impedância
Z _{imag}	Componente imaginária da Impedância
Z _{real}	Componente real da Impedância
ΔE	Varição de Potencial
Δi	Varição de corrente
μm	Micrômetro
ρ	Densidade do metal
Ω	Ohm

SUMÁRIO

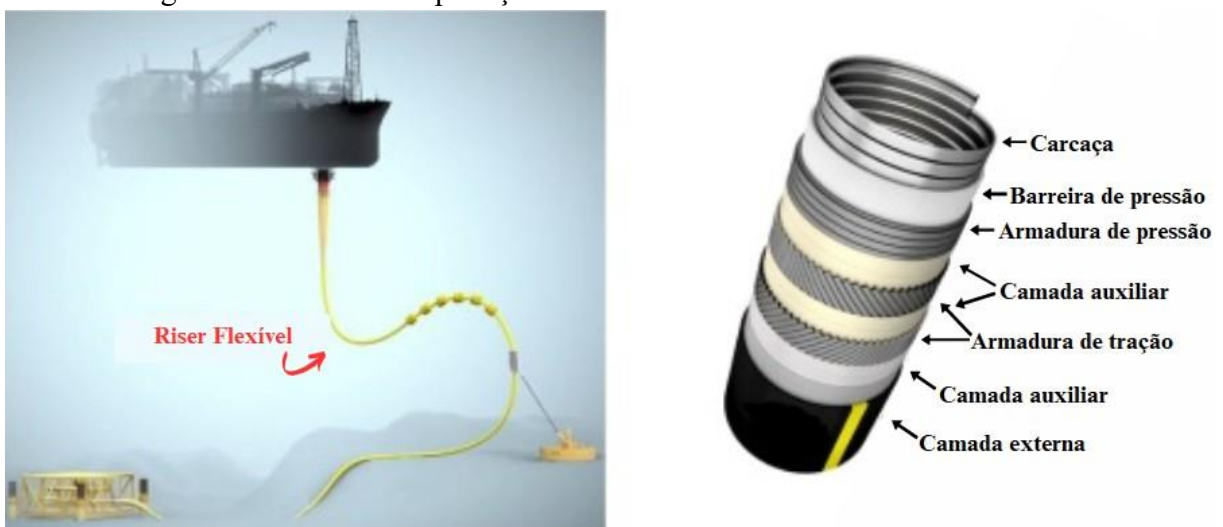
1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1	Aço Carbono	20
3.2	Corrosão no Aço Carbono	20
3.3	Corrosão por CO₂ no Aço Carbono	22
3.4	Técnicas de Caracterização Microestrutural	23
3.4.1	<i>Microscopia Óptica (MO)</i>	24
3.4.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	24
3.5	Testes Eletroquímicos	24
3.5.1	<i>Potencial de Circuito Aberto (OCP)</i>	25
3.5.2	<i>Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)</i>	25
3.5.3	<i>Polarização Linear (LPR)</i>	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	31
5.2	Potencial de Circuito Aberto (OCP)	32
5.3	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)	33
5.4	Polarização Linear (LPR)	34
5.5	Microscopia Óptica (MO)	35
6	CONCLUSÃO	38
7	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo e gás é um dos pilares da economia global, responsável por suprir grande parte da demanda energética mundial. Segundo o relatório de 2024 da Agência Internacional de Energia (IEA), até 2030 o setor de combustíveis fósseis responderá por aproximadamente 73% da matriz energética global, destacando-se como um dos principais motores do desenvolvimento industrial e tecnológico. No entanto, a exploração de reservas em águas profundas e ultraprofundas apresenta desafios técnicos significativos, exigindo soluções inovadoras para garantir a eficiência e a segurança das operações.

Nesse contexto, os risers flexíveis emergem como componentes críticos para a exploração e produção de petróleo e gás offshore. Risers são dutos que conectam as plataformas de produção aos poços submarinos, permitindo o transporte de fluidos (petróleo, gás e água) entre esses pontos. Diferentemente dos risers rígidos, que são feitos de aço e possuem limitações em termos de flexibilidade e instalação, os risers flexíveis são construídos com materiais compostos, como polímeros e camadas de aço entrelaçadas, as camadas poliméricas funcionam como componentes de vedação, antidesgaste e/ou isolamento térmico, enquanto as camadas metálicas suportam as cargas impostas (Li, et al, 2018) o que lhes confere maior adaptabilidade a movimentos dinâmicos e condições ambientais adversas. A Figura 1 mostra a estrutura e a aplicação de um riser flexível.

Figura 1 – Estrutura e aplicação de um Riser Flexível.



Fonte: Li, et al (2018, com traduções).

A importância dos risers flexíveis está diretamente relacionada à sua capacidade de suportar cargas mecânicas complexas, como ondas, correntes marítimas e movimentos da plataforma, sem comprometer a integridade estrutural. Conforme destacado por Sun e Qi (2011)

"O desempenho mecânico de um riser flexível é mais notável do que outros risers em condições ambientais violentas" os risers flexíveis são essenciais para operações em águas profundas, onde a instalação de risers rígidos se torna inviável devido às altas pressões e temperaturas. Além disso, sua flexibilidade permite a instalação em campos com geometrias complexas, ampliando as possibilidades de exploração em áreas antes consideradas inacessíveis.

No entanto, apesar de seus benefícios, os risers flexíveis enfrentam desafios relacionados à sua integridade estrutural ao longo do tempo. Aproximadamente 60% das falhas em campos petrolíferos estão relacionadas à corrosão por CO₂ (PEREZ, 2013), estas ocorrências estão relacionadas à degradação dos materiais metálicos empregados nesses componentes, especialmente na armadura de tração, sob o meio de água oceânica, saturada de gases originários do óleo cru transportado internamente. A exposição a esses elementos corrosivos pode levar à degradação dos materiais, comprometendo a segurança das operações.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência do gás carbônico na resistência à corrosão dos materiais metálicos empregados nessas armaduras, como por exemplo os aços AISI 1070 e 1075, através de testes eletroquímicos, tanto em meios saturados de CO₂, quanto em sua ausência.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do dióxido de carbono na resistência à corrosão dos aços AISI 1070 e 1075 em solução de água do mar sintética.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar testes eletroquímicos, tais como: Potencial de Circuito Aberto, Polarização Linear e Impedância Eletroquímica, a fim de obter dados e compreender o comportamento eletroquímico do material;
- Caracterizar as superfícies das ligas, utilizando de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia óptica (MO), com a finalidade de obter informações sobre o tipo de corrosão predominante;
- Estimar a taxa de corrosão e a resistência a polarização do material na presença e na ausência do dióxido de carbono.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aço Carbono

O aço carbono é uma liga ferro-carbono, com teores de carbono que variam tipicamente entre 0,008% e 2,11%, além de certos elementos residuais resultantes do processo de fabricação (CHIAVERINI, 1988, p. 21). Essa variação no teor de carbono confere ao material uma ampla gama de propriedades mecânicas, tornando-o um dos materiais mais utilizados na indústria, especialmente em aplicações estruturais e de engenharia. “Aços carbono e aços carbono de baixa liga (LAS) são a primeira alternativa a ser considerada na seleção de materiais não apenas do ponto de vista de custo, mas também devido à sua disponibilidade” (PEREZ, 2013).

Os aços carbono são classificados de acordo com o teor de carbono presente em sua composição, uma vez que este influencia diretamente em suas propriedades, sendo:

- Aços de baixo carbono aqueles com até 0,25% de carbono, que possuem alta ductilidade e tenacidade, sendo facilmente conformáveis e soldáveis;
- Aços de médio carbono aqueles com 0,25% a 0,60% de carbono, apresentam menor ductilidade e maior resistência mecânica em comparação aos aços de baixo carbono;
- Aços de alto carbono que tem até 2,11% de carbono, caracterizados por alta dureza e resistência ao desgaste, porém com menor tenacidade.

Os aços AISI 1070 e 1075, que são o foco deste estudo, são classificados como aços de alto carbono, com teores de carbono de aproximadamente 0,73% e 0,75%, respectivamente, eles são empregados em risers flexíveis devido à sua alta resistência mecânica e capacidade de suportar cargas cíclicas. Além disso, sua conformabilidade e soldabilidade facilitam a fabricação de risers com geometrias complexas, essenciais para operações em águas profundas.

3.2 Corrosão no Aço Carbono

A corrosão é um processo natural que ocorre quando materiais metálicos, como o aço carbono, reagem com o ambiente ao seu redor, resultando na degradação do material. “Para os materiais metálicos, o processo de corrosão é normalmente eletroquímico, ou seja, consiste em uma reação química na qual há uma transferência de elétrons de uma espécie

química para outra” (CALLISTER, 2016, p. 627). No caso do aço carbono, a corrosão é um fenômeno particularmente relevante devido à ampla utilização desse material em ambientes agressivos, como na indústria de petróleo e gás, construção civil e infraestrutura marítima.

A corrosão no aço carbono ocorre principalmente por meio de reações eletroquímicas, nas quais o ferro (Fe) oxida-se, formando óxidos e hidróxidos. O processo básico envolve a formação de uma célula eletroquímica, onde o aço atua como ânodo, liberando elétrons, e o ambiente atua como eletrólito.

O aço carbono está sujeito a diversas formas de corrosão, “As principais preocupações com tubos de fundo de poço do ponto de vista da problemática da corrosão relacionada são rachaduras ambientais e corrosão uniforme ou localizada” (PEREZ, 2013).

O ataque uniforme é uma forma de corrosão eletroquímica que ocorre com intensidade equivalente ao longo de toda a superfície que está exposta (CALLISTER, 2016, p. 642). É o tipo mais comum e previsível de corrosão. À luz das condições experimentais empregadas neste estudo, espera-se que esse seja o tipo de corrosão predominante.

Já a corrosão por pite, classificado como um tipo de corrosão localizada, é uma das formas mais críticas de corrosão devido a sua difícil identificação. “A corrosão por pite ocorre em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica, formando cavidades” (LOMBARDI, 1993).

Além disso, a corrosão-erosão também é um fator a se considerar, uma vez que esta surge da ação combinada de um ataque químico e da abrasão ou desgaste mecânico causado pelo movimento de um fluido. Ela é sobretudo prejudicial para as ligas que são passivadas pela formação de um filme superficial protetor (CALLISTER, 2016, p. 646).

A taxa e a severidade da corrosão no aço carbono dependem de fatores como a composição química do aço, uma vez que a presença de elementos como manganês, silício e fósforo pode afetar a resistência à corrosão, as condições ambientais como umidade, temperatura, pH e presença de sais ou gases corrosivos, e a aplicação de cargas cíclicas ou estáticas pode levar à corrosão sob tensão ou fadiga-corrosão.

Embora o aço carbono seja amplamente utilizado devido ao seu custo-benefício, sua resistência à corrosão é limitada, “[...] sob condições ambientais altamente agressivas e altas temperaturas, materiais mais caros, como ligas resistentes à corrosão (CRAs), podem ser necessários.” (PEREZ, 2013). Em ambientes como água do mar ou na presença de gases ácidos, a corrosão pode ocorrer mais rapidamente

3.3 Corrosão por CO₂ no Aço Carbono

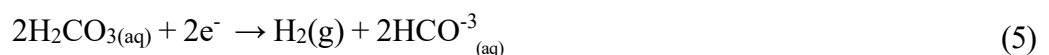
A corrosão por CO₂, é um problema bastante presente na indústria petrolífera, ocorrendo em todas as etapas de produção, desde a prospecção até as instalações de processamento (RODRIGUES, 2021) e frequentemente envolve outras espécies corrosivas como sulfeto de hidrogênio e ácido orgânico (NEŠIĆ, 2007).

O gás carbônico em si não é considerado um agente corrosivo para os metais, entretanto, sua presença em meio aquoso promove a ionização e a formação do ácido carbônico, que diminui o pH do meio (LIMA, 2019). A reação química que descreve esse fenômeno está descrita na Equação 1:



O gás CO₂ é dissolvido na fase aquosa do petróleo bruto, onde o ácido carbônico (H₂CO₃) é produzido (Equação 1). O ácido resultante sofre dissociação adicional, produzindo íons de hidrogênio (Equação 2, 3) aumentando a acidez do meio, acelerando a corrosão.

No entanto, o efeito do CO₂ não se limita apenas à produção do ácido carbônico, uma vez que este é um ácido fraco e na literatura foi observado que as taxas de corrosão na presença de CO₂ eram maiores, em determinado pH, do que as encontradas em ácidos fortes, com valores de pH inferiores. Isso ocorre pois, em ácidos fortes, que são completamente dissociados, a taxa de evolução do hidrogênio não pode exceder a taxa na qual os íons H⁺ podem ser transportados para a superfície da solução em massa (NEŠIĆ, 2007), já a presença do H₂CO₃ permite uma taxa de evolução de hidrogênio maior. As Equações 4, 5 e 6 descrevem as reações de evolução de hidrogênio propostas na literatura para esse sistema.





Conforme destacado por Rodrigues (2021) as reações de hidratação do CO_2 e de redução direta do H_2CO_3 contribuem para o aumento da velocidade de reação catódica uma vez que estas são fontes de íons H^+ para as reações de evolução de hidrogênio.

Durante o processo de corrosão, a reação dominante é a reação anódica, de dissolução do ferro, descrita pela Equação 7.



Há ainda, uma espécie química secundária envolvida no processo corrosivo de aço carbono na presença de CO_2 , o carbonato de ferro, que pode se depositar na superfície do aço, formando um filme passivo de acordo com a Equação 8, para tal é necessário que o produto das atividades dos íons Fe^{+2} e CO_3^{-2} exceda o produto de solubilidade, tornando-se termodinamicamente possível que o FeCO_3 precipite da solução na superfície do aço (BARKER, et. al, 2018). A solubilidade desses íons depende do pH da solução, da pressão parcial de CO_2 e da temperatura (PEREZ, 2013).



Este filme, apesar de evitar a corrosão na superfície do metal, irá se degradar sob estresse ou em fluxos de alta velocidade, tornando-o suscetível a buracos e rachaduras (AL-MOUBARAKI, OBOT, 2021). A capacidade protetora da camada depende de diversas condições ambientais, como concentração de ferro, pH da solução, temperatura, pressão parcial de CO_2 , forças mecânicas presentes no escoamento e microestrutura do aço carbono (FARELAS, et. al, 2010)

3.4 Técnicas de Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural de materiais como os aços carbono, é essencial para compreender suas propriedades e comportamento frente à corrosão. Duas das técnicas mais utilizadas para esta finalidade são a Microscopia Óptica (MO) e a Microscopia

Eletrônica de Varredura (MEV), que fornecem informações complementares em diferentes escalas de observação.

3.4.1 Microscopia Óptica (MO)

A Microscopia Óptica (MO) consiste principalmente em um sistema de iluminação e um sistema de oculares. O sistema de iluminação determina a ampliação da objetiva, a abertura numérica, a resolução, a profundidade e a curvatura de campo (ARDEBILI, 2009). Esta técnica é útil para identificar fases, avaliar o tamanho de grão e detectar inclusões não-metálicas como sulfetos e óxidos. No estudo da corrosão a MO nos permite avaliar a superfície do material antes e após exposição corrosiva, auxiliando na identificação de produtos de corrosão.

3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons focalizado que interage com a amostra, gerando sinais que permitem imagens com ampliações de até ~10.000x e resolução nanométrica. Como o comprimento de onda do feixe de elétrons é muito menor que o da luz visível, a resolução do MEV é muito superior à de um microscópio óptico (XIAO, et al, 2022), além de permitir imagens tridimensionais da superfície, análise elementar através de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e topografia detalhada.

3.5 Técnicas Eletroquímicas

A eletroquímica desempenha um papel fundamental no estudo da corrosão, uma vez que a corrosão é essencialmente um processo eletroquímico (BRADFORD, 2003) ela fornece ferramentas para avaliar o comportamento de materiais em diferentes ambientes. Entre as técnicas utilizadas estão a medição do Potencial de Circuito Aberto (OCP, do inglês *Open Circuit Potential*), a Polarização Linear (LPR, do inglês *Linear Polarization Resistance*) e a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS, do inglês *Electrochemical Impedance Spectroscopy*).

Esses métodos dependem do uso de eletrodos eletroquímicos, que são condutores metálicos ou não metálicos que permitem a transferência de elétrons entre um material e um potenciostato. Em estudos de corrosão, os eletrodos são utilizados em células eletroquímicas, para medir potenciais e correntes, fornecendo informações sobre o comportamento eletroquímico do material.

Uma célula eletroquímica é um sistema amplamente utilizado em estudos eletroquímicos, as células devem ter quatro componentes: um ânodo, um cátodo, um eletrólito e uma conexão condutora de elétrons entre os eletrodos. Se algum componente estiver faltando na célula, a corrosão eletroquímica não ocorrerá (BRADFORD, 2003).

3.5.1 Potencial de Circuito Aberto (OCP)

O OCP, é o potencial no qual as reações catódicas e anódicas ocorrem na mesma velocidade, pode-se então dizer que o sistema encontra-se no estado estacionário (MARQUES, 2021). Este potencial é medido entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência, na ausência de corrente externa, sendo útil para avaliar a tendência de corrosão de um material em um determinado ambiente.

3.5.2 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)

A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica é uma técnica que mede a resposta de um sistema eletroquímico a um sinal de corrente alternada (AC) aplicado em diferentes frequências, fornecendo informações sobre processos como a formação de camadas de óxido, a difusão de íons e a cinética de reações de corrosão. “[...] o sistema adquire caráter mais passivo, isto é, maior restrição à passagem de corrente para maior valor de impedância, resultando em uma taxa de corrosão mais baixa possível.” (FONSECA, 2022).

Para determinar o valor de módulo de impedância ($|Z|$) utiliza-se a relação entre as componentes real e imaginária da impedância eletroquímica, conforme a Equação 9

$$|Z| = \sqrt{(Z_{\text{real}}^2 + Z_{\text{imag}}^2)} \quad (9)$$

3.5.3 Polarização Linear (LPR)

A técnica de Polarização Linear mede a resistência à polarização de um material, que está diretamente relacionada à resistência à corrosão do material. Aplicando-se uma

pequena variação de potencial em torno do OCP e medindo-se a corrente resultante. A razão entre a tensão e a corrente é a resistência de polarização linear que, de acordo com a relação de Stern-Geary (Eq. 10), é inversamente proporcional à corrente de corrosão (AGRAWAL, 2001)

$$R_p = \Delta E / \Delta i \quad (10)$$

O gráfico do LPR é plotado com o valor de potencial na abscissa e o valor de corrente na ordenada, dessa forma, o valor de R_p será proporcional à inclinação da curva. A taxa de corrosão pode ser calculada a partir de i_{corr} usando a lei de Faraday, se a constante B for conhecida (AGRAWAL, 2001). Como mostrado nas Equações 11 e 12.

$$i_{\text{corr}} = B / R_p \quad (11)$$

$$CR = 3,27 \times 10^{-3} \times i_{\text{corr}} EW / \rho \quad (12)$$

Onde:

i_{corr} = Densidade de corrente de corrosão (A/ cm²);

B = Constante de Stern-geary;

CR = Taxa de corrosão (mm/ano);

EW = peso equivalente do metal (g);

ρ = Densidade do metal (g/cm³).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais selecionados para este estudo, cuja composição química foi determinada em um Espectrômetro de Emissão Ótica modelo PDA 7000 da Shimadzu, e está descrita na Tabela 1, foram classificados como aços carbono AISI 1070 e 1075, conforme a norma ASTM A1040. Os materiais foram disponibilizados pela empresa Petrobrás, na forma de barras com dimensões 7,5 mm x 15 mm x 176 mm e 6 mm x 15 mm x 180 mm, para AISI 1070 e AISI 1075 respectivamente.

Tabela 1 – Composição química dos aços AISI 1070 e 1075 (% em peso).

Element	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Al	%Fe
AISI 1070	0,734	0,596	0,013	0,002	0,233	0,031	Bal
AISI 1075	0,750	0,650	0,015	0,012	0,300	0,060	Bal

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a caracterização microestrutural das amostras, todas foram embutidas em baquelite em sua seção transversal, conforme mostrado na Figura 2, lixadas de 100 a 1200 mesh, polidas com pasta de diamante de 3 a 1 μm . As amostras foram borrifadas com álcool e secadas a quente. Todas foram atacadas com Nital 2% para revelar sua microestrutura. A aquisição de imagens foi feita com o uso de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo FEI® Quanta 450 e FEI® Quanta 650.

Figura 2 – Seção Transversal da barra.



Fonte: Elaborado pelo autor

A metodologia proposta para o estudo da corrosão desses materiais está esquematizada na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma de metodologia Experimental.

Preparação dos Eletrodos de Trabalho	<ul style="list-style-type: none"> • Corte da amostra e conexão elétrica com fio de cobre • Embutimento em resina acrílica.
Preparação da Solução Eletrolítica	<ul style="list-style-type: none"> • Preparo conforme norma ASTM D1141-98 • Ajustar para pH $8,2 \pm 0,1$ com solução de NaOH 0,1M
Preparação da Superfície	<ul style="list-style-type: none"> • Sequência progressiva de lixamento • Secagem com álcool a cada etapa • Aplicar base nas bordas
Configuração Experimental	<ul style="list-style-type: none"> • Célula Eletroquímica: <ul style="list-style-type: none"> ○ Eletrodo de Trabalho: amostra encapsulada ○ Eletrodo de Referência: Ag/AgCl (KCl 3M) ○ Contra-Eletrodo: Pt (2 cm²) ○ Volume de solução: 100 mL • Controle de Temperatura: <ul style="list-style-type: none"> ○ $40 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ • Controle Atmosférico: <ul style="list-style-type: none"> ○ Purga inicial com N₂ por 15 min ○ Para ensaios com CO₂: fazer saturação adicional com CO₂ por 15 min
Caracterização Eletroquímica	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de Circuito Aberto (OCP) • Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) • Polarização Linear (LPR)
Caracterização Microestrutural	<ul style="list-style-type: none"> • Microscopia óptica (MO) • Microscopia eletrônica de varredura

Fonte: Elaborado pelo autor.

O início do processo de preparação das amostras se deu com o corte destes materiais em uma máquina cut-off, para que as dimensões fossem adequadas para os ensaios. Assim, obteve-se seis amostras, sendo três para o AISI 1070 e três para o AISI 1075. A etapa seguinte da preparação foi a união de fios de cobre em cada amostra para conexão elétrica, seguido da etapa de embutimento a frio em resina epóxi das seis amostras.

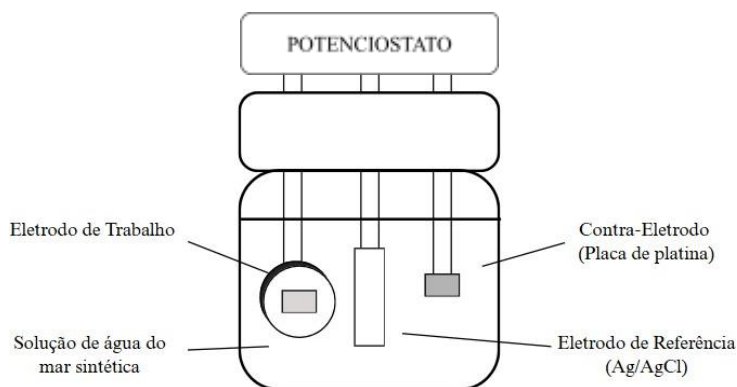
Antes de cada ensaio foi feito o lixamento dos materiais em lixas d'água com granulometria de 220, 320, 400, 600 e 1200 para obter a superfície adequada exigida na realização dos ensaios.

A área de análise foi delimitada e tiradas fotos no microscópio óptico modelo D-35578, marca Leica, em aumentos de 50x, 100x, 200x e 500x, utilizando o software LAS X® versão 5.2.2.28326, apenas com a finalidade de observar os impactos superficiais nas amostras antes e depois de submetê-las ao procedimento.

O eletrólito utilizado nos testes eletroquímicos foi uma solução de água do mar sintética, preparada de acordo com a norma ASTM D1141-98, utilizando sais reagentes: NaCl, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, Na_2SO_4 , $CaCl_2$, KCl, $NaHCO_3$, KBr, H_3BO_3 , $SrCl_2$, NaF. O pH da solução foi ajustado para $8,2 \pm 0,1$ pelo menos trinta minutos antes do ensaio, utilizando solução de NaOH 0,1M e a temperatura de trabalho do eletrólito foi 40 °C, com a finalidade de simular o ambiente no qual os risers flexíveis operam.

Na Figura 2 está esquematizado a célula eletroquímica de três eletrodos utilizada neste trabalho: o eletrodo de trabalho, ou seja, o material sob investigação, o eletrodo de referência, que fornece um potencial estável e conhecido (eletrodo de prata-cloreto de prata) e o contra-eletrodo responsável por completar o circuito elétrico, permitindo a aplicação de corrente ou potencial.

Figura 4 – Esquemático da célula eletroquímica de três eletrodos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Neste trabalho, os ensaios foram realizados utilizando 100 ml de solução e três eletrodos na célula eletroquímica: o eletrodo de trabalho (Aços AISI 1070 e 1075), o eletrodo de referência de prata-cloreto de prata (Ag/AgCl) e contra eletrodo de platina, conforme mostrado na Figura 2.

O monitoramento de OCP precedeu todas as outras técnicas eletroquímicas. Sendo assim, foi realizado com duração de 3600 segundos para os ensaios de EIS, a aferição de potencial foi a cada 0,1 segundo.

A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica foi realizada utilizando frequências entre 1×10^5 Hz e 0,006 Hz, amplitude de 0,01V e 5 pontos por década, após os ensaios foram

calculados os valores de resistências de polarização.

Já a Polarização Linear foi feita utilizando uma amplitude de ± 20 mV vs OCP, uma velocidade de medição de 1 mV/s, um peso equivalente de 27,925 g/mol, densidade de 7,86 g/cm³ e valores de b_a e b_c de 0,12 V/dec, feito após a medição de cada OCP na duração de 5, 60, 120 e 180 minutos e por fim foram calculadas as taxas de corrosão (mm/ano) e as resistências de polarização.

Todas as técnicas eletroquímicas foram realizadas em triplicata, sob duas condições experimentais. Na condição de ausência de CO₂, o eletrólito foi purgado com nitrogênio, iniciado 15 minutos antes do ensaio e mantido continuamente durante toda a sua duração. Na condição de saturação de CO₂, o sistema foi inicialmente purgado com nitrogênio por 15 minutos, seguido pela purga com CO₂ por mais 15 minutos, em seguida o ensaio foi iniciado com o CO₂ sendo continuamente borbulhado ao longo de toda a medida. Os ensaios foram realizados utilizando autolab modelo PGSTAT302N, marca METROHM e o software NOVA® versão 2.17.

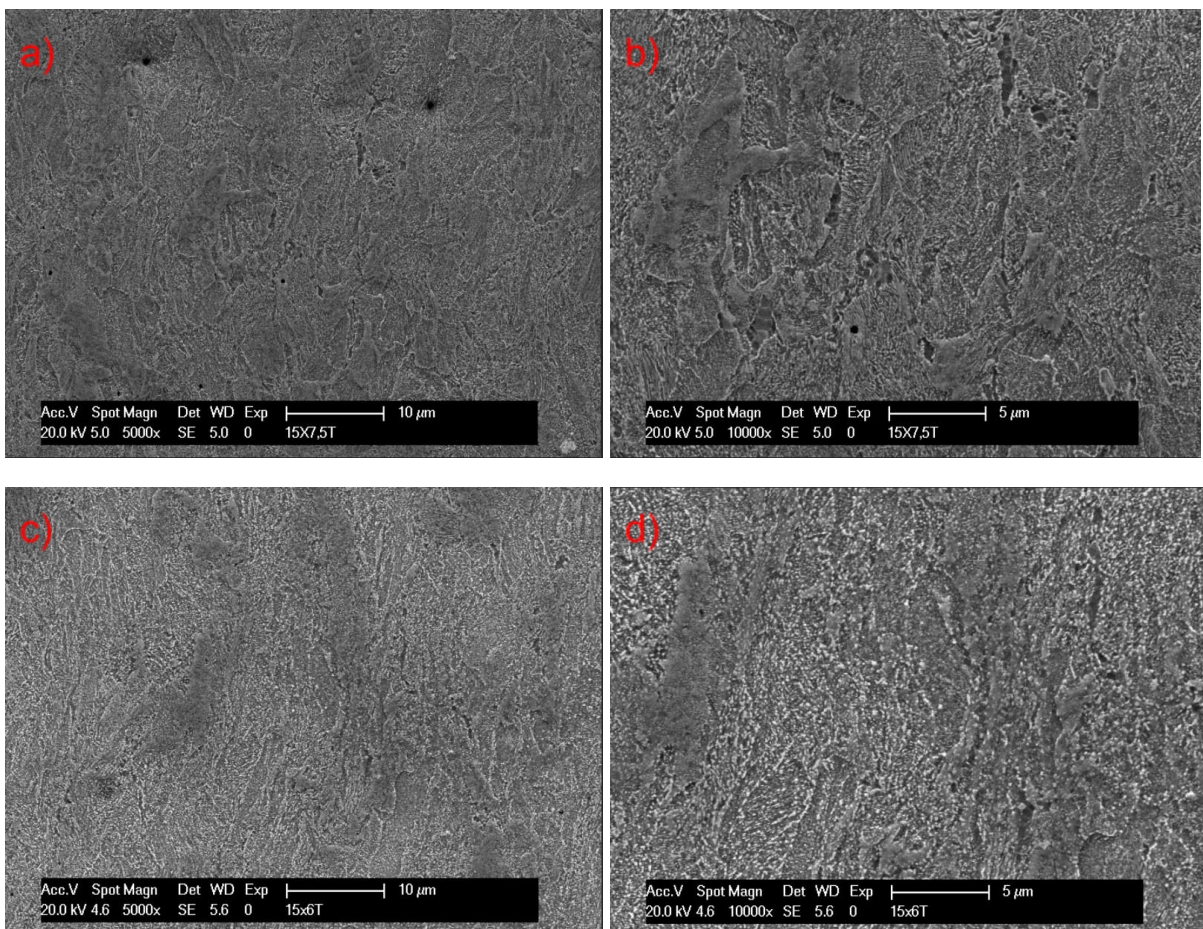
Ademais, após cada ensaio é feita a medição da área exposta com paquímetro digital, além da documentação fotográfica com MO (mesmas ampliações iniciais) e a análise comparativa das imagens.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 5 apresenta, respectivamente, as micrografias do aço AISI 1070 e 1075, obtidas por MEV.

Figura 5 – Micrografias da seção transversal dos aços a) AISI 1070 a 5000x b) AISI 1070 a 10000x c) AISI 1075 a 5000x d) AISI 1075 a 10000x.



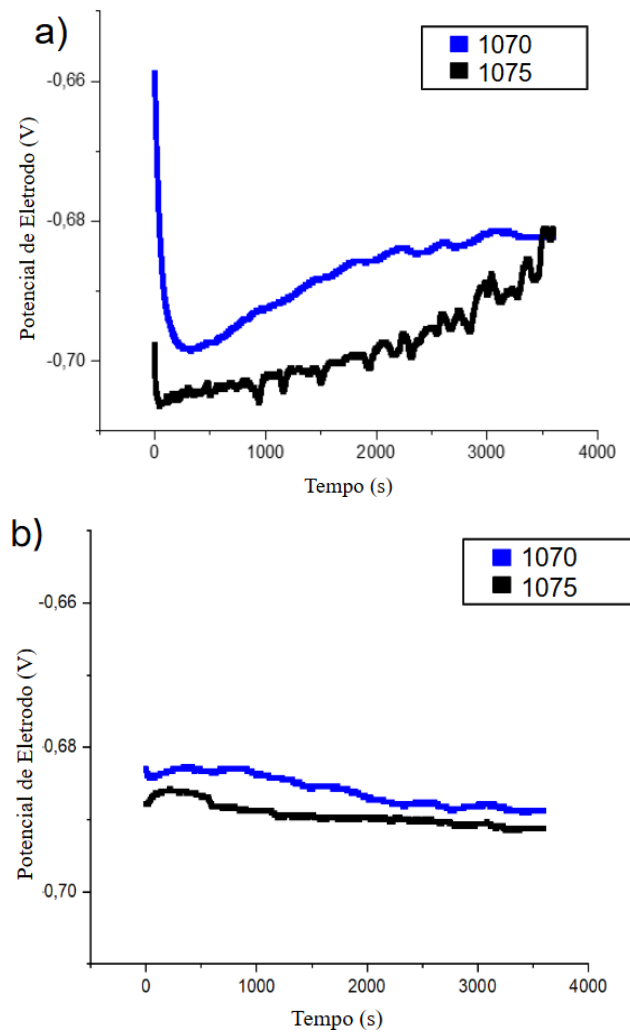
Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se que ambos os aços apresentam uma microestrutura uniforme e predominantemente perlítica, o que é coerente com a composição química dos materiais e sugere um resfriamento lento após a laminação, indicando ausência de tratamento térmico posterior ao processo de conformação.

5.2 Potencial de Circuito Aberto (OCP)

A Figura 6 foi gerada a partir do monitoramento do OCP que precederam os ensaios de impedância, ou seja, com duração de 1 hora, nos dois materiais e em ambas as condições, a escala dos gráficos foi mantida a mesma a fim de tornar mais simples a comparação.

Figura 6 – Monitoramento do OCP, nos aços AISI 1070 e AISI 1075 na ausência (a) e na presença de CO₂ (b).



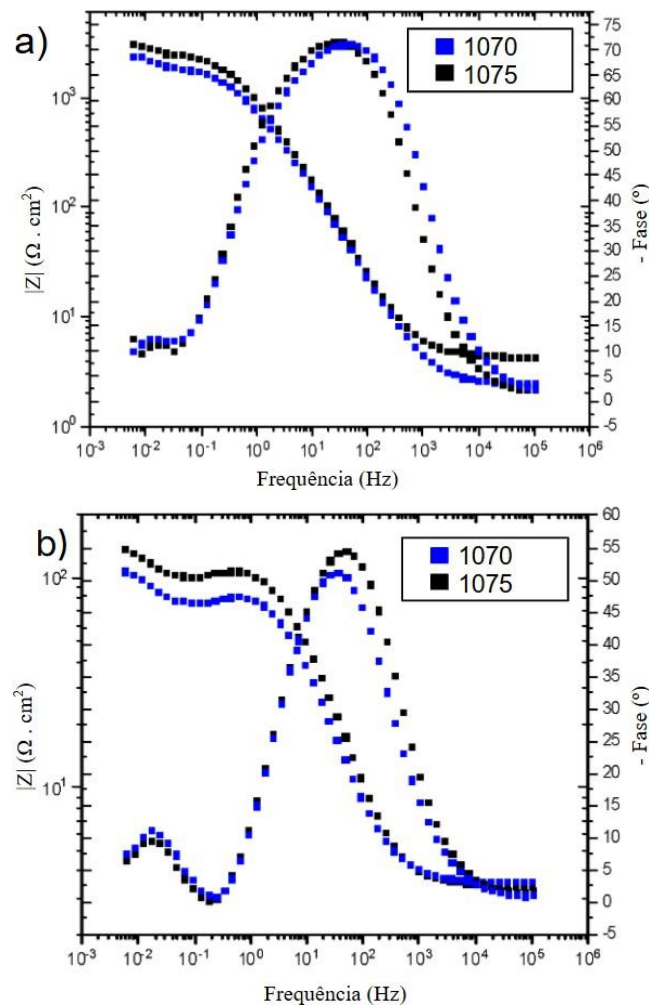
Fonte: Elaborado pelo Autor

É possível observar que apesar de valores finais de OCP próximos, na condição de ausência de CO₂ houve um aumento do potencial do material com o passar do tempo, enquanto na condição de presença de CO₂ houve uma diminuição do potencial, valores menores de OCP não podem ser relacionados a resistência à corrosão, mas são um indicativo de uma maior tendência oxidativa. A maior estabilidade do potencial na presença do CO₂ pode estar relacionada a formação de uma camada de óxido na superfície.

5.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)

A Figura 7, é um gráfico Bode Módulo x Bode Fase extraído dos dados fornecidos pelos ensaios de impedância, medidos a partir do OCP, nos dois materiais e em ambas as condições.

Figura 7 – Bode Módulo x Bode Fase, nos aços AISI 1070 e AISI 1075 na ausência (a) e na presença de CO₂ (b).



Fonte: Elaborado pelo Autor

Fazendo a análise dos diagramas de Bode, é possível observar que a forma dos diagramas de módulo e fase para ambos os aços é muito semelhante, tanto na condição saturada de CO₂, quanto na sua ausência, o que indica uma cinética de corrosão parecida para ambos os materiais. Além disso, é possível perceber que o aço AISI 1075 apresenta maiores valores de impedância nas frequências mais baixas, o que está relacionado com o comportamento mais resistivo do material, em comparação ao AISI 1070.

Comparando os meios, a presença de CO₂ reduz significativamente os valores de impedância em baixas frequências para ambos os aços, o que indica a maior corrosividade do meio, comportamento já esperado.

A Tabela 2 apresenta os valores médios de Módulo de Impedância ($|Z|$) obtidos por meio da Equação 9, através dos valores das componentes real (Z_{real}) e imaginária (Z_{imag}) da impedância, extraídos diretamente do ensaio, juntamente ao desvio padrão.

Tabela 2 – Valores de médios de $|Z|$ para os ensaios de EIS dos aços AISI 1070 e 1075, na ausência e presença de CO₂.

$ Z $ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)			
1070 - Ausência	1070 - Presença	1075 - Ausência	1075 - Presença
1618,25 ± 812,35	90,61 ± 17,58	2343,54 ± 746,98	136,87 ± 0,93

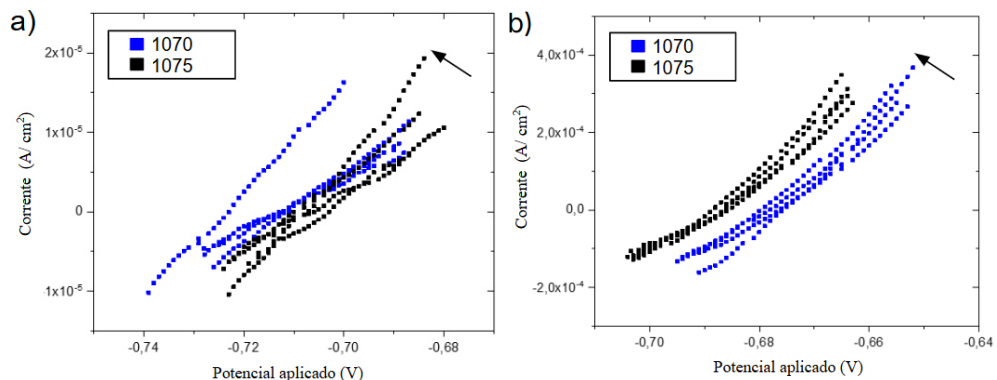
Fonte: Elaborado pelo Autor

Os valores apresentados na Tabela 2 corroboram com os resultados apresentados anteriormente. O aço 1075 apresenta maiores valores de R_p para ambos ambientes e a presença de CO₂ levou a diminuição nos valores de R_p em ambos os aços. Os menores valores de desvio padrão para o aço 1075 sugerem um comportamento estável e reprodutível do sistema.

5.4 Polarização linear (LPR)

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos pelos ensaios de LPR, nos tempos de 5 min, 1 hora, 2 horas e 3 horas, a seta no gráfico indica o sentido da passagem do tempo.

Figura 8 – LPR's nos aços AISI 1070 e AISI 1075 na ausência e na presença de CO₂.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os valores médios de R_p obtidos pelo ensaio de LPR, a partir da Equação 10

estão descritos na Tabela 3, juntamente aos devidos desvios padrões.

Tabela 3 – Valores de médios de Rp para os ensaios de LPR dos aços AISI 1070 e 1075, na ausência e presença de CO₂.

Tempo	Rp ($\Omega.cm^2$)			
	1070 - Ausência	1070 - Presença	1075 - Ausência	1075 - Presença
5 min	1093,71 \pm 777,19	68,60 \pm 13,57	1515,45 \pm 71,14	117,22 \pm 13,69
1 hour	1577,73 \pm 1056,21	88,90 \pm 11,90	1914,20 \pm 327,71	115,57 \pm 21,67
2 hours	2099,30 \pm 1402,59	99,30 \pm 17,04	2140,34 \pm 353,15	135,51 \pm 29,73
3 hours	2627,45 \pm 1766,17	105,00 \pm 15,41	2329,75 \pm 432,92	145,67 \pm 30,79

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os valores médios de Taxa de corrosão obtidos pelo ensaio de LPR, a partir das Equações 11 e 12 estão descritos na Tabela 4, juntamente aos devidos desvios padrões.

Tabela 4 – Valores de médios de Taxa de corrosão para os ensaios de LPR dos aços AISI 1070 e 1075, na ausência e presença de CO₂.

Tempo	Taxa (mm/ano)			
	1070 - Ausência	1070 - Presença	1075 - Ausência	1075 - Presença
5 min	0,783 \pm 0,89223	4,532 \pm 0,92857	0,200 \pm 0,00926	2,608 \pm 0,32290
1 hora	0,668 \pm 0,97690	3,450 \pm 0,49078	0,161 \pm 0,02906	2,690 \pm 0,56059
2 horas	0,577 \pm 0,90445	3,118 \pm 0,59224	0,144 \pm 0,02583	2,317 \pm 0,56525
3 horas	0,491 \pm 0,78476	2,943 \pm 0,46460	0,133 \pm 0,02507	2,148 \pm 0,49751

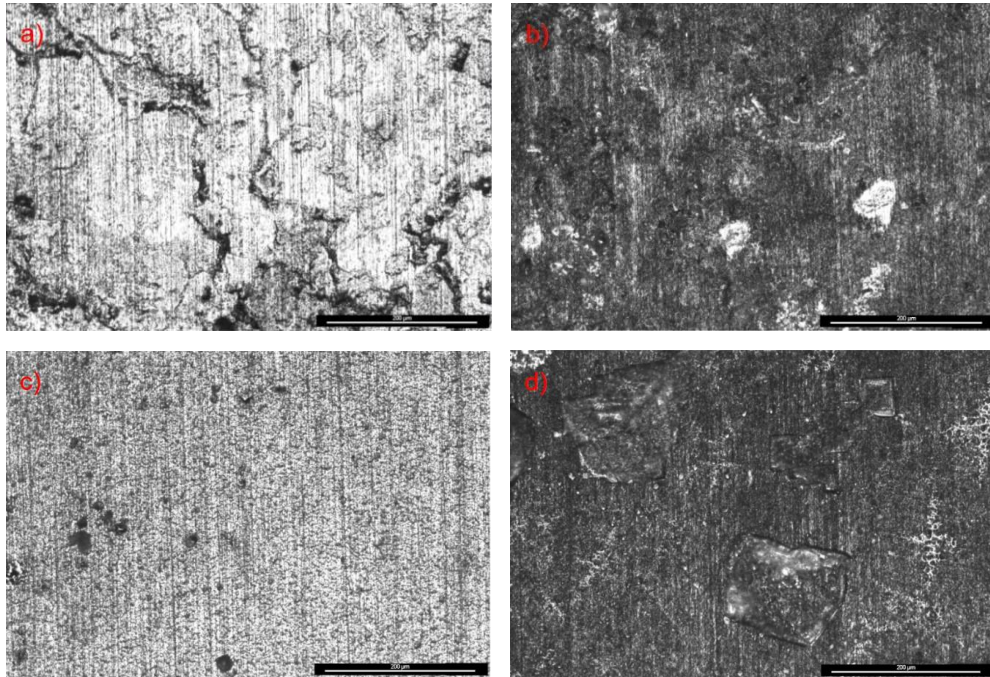
Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados indicam novamente um comportamento mais resistivo para o aço 1075, em ambos os ambientes, de forma geral é possível observar maiores valores de Rp para esse material, menores valores de Taxa de corrosão. Além disso, o efeito do CO₂ no comportamento eletroquímico dos materiais foi semelhante ao que foi visto nos outros ensaios, afetando negativa e significativamente sua resistência à corrosão. Outro ponto interessante que pode-se comentar a respeito dos resultados deste ensaio, é o aumento nos valores de Rp e diminuição dos valores de Taxa de corrosão com o passar do tempo, isso provavelmente se dá devido a formação de uma camada superficial que dificulta reações químicas entre a superfície do material e o meio, desde que essa camada permaneça aderida à superfície, o que, como citado anteriormente, pode não ocorrer em ambientes de fluxos turbulentos, como os que os risers atuam.

5.5 Microscopia Óptica (MO)

A Figura 9 apresenta as imagens da superfície do material, obtidas por MO, em uma ampliação de 200x, da amostra de aço AISI 1070.

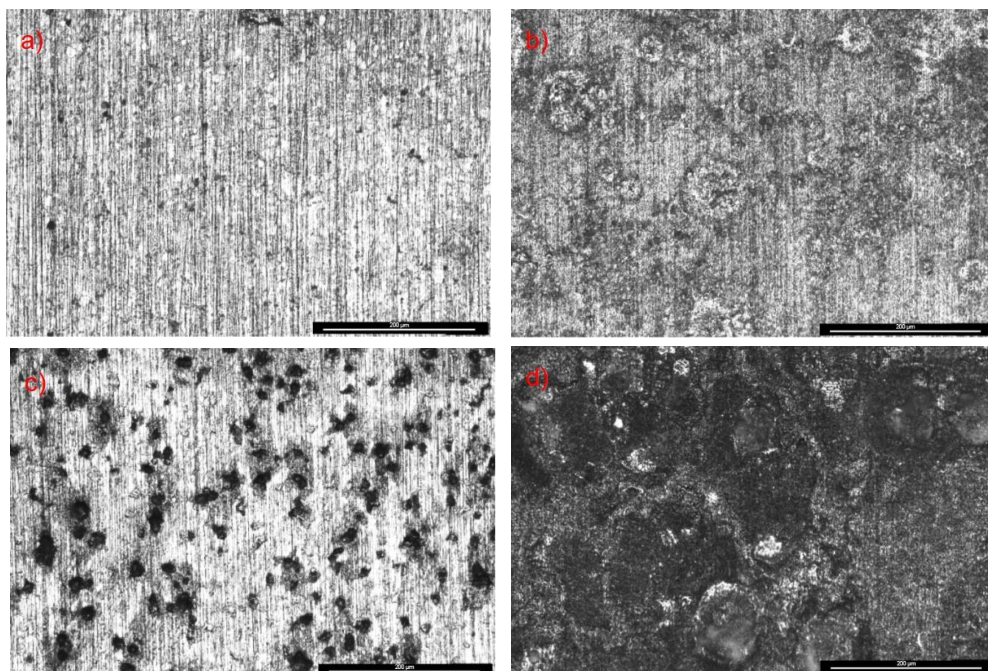
Figura 9 – Condição da superfície do aço AISI 1070 a) pós-ensaio de impedância na ausência de CO_2 , b) pós-ensaio de impedância na presença de CO_2 , c) pós-ensaio de LPR na ausência de CO_2 , d) pós-ensaio de LPR na presença de CO_2 .



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 10 apresenta as imagens da superfície do material, obtidas por MO, em uma ampliação de 200x, da amostra de aço AISI 1075.

Figura 10 – Condição da superfície do aço AISI 1075 a) pós-ensaio de impedância na ausência de CO_2 , b) pós-ensaio de impedância na presença de CO_2 , c) pós-ensaio de LPR na ausência de CO_2 , d) pós-ensaio de LPR na presença de CO_2 .



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em ambos os materiais é possível observar corrosão generalizada em todas as superfícies pós-ensaio, além disso é notável o efeito negativo da presença de CO₂ na resistência à corrosão dos materiais, uma vez que os ensaios na sua presença apresentaram maior formação de óxido. As condições de superfície mais oxidadas nos ensaios de LPR são esperadas devido ao maior tempo de imersão e ao caráter mais agressivo do ensaio. Comparando os dois materiais, observa-se que o aço AISI 1075 apresentou de forma geral menor formação de óxido, sugerindo maior resistência à corrosão, corroborando com os resultados obtidos nos testes eletroquímicos. Comportamento associado a formação de camadas de óxidos mais estáveis e aderentes, provavelmente devido à pequenas variações de elementos nas composições químicas.

6 CONCLUSÃO

Com base nos ensaios eletroquímicos realizados foi possível concluir que:

- A presença de CO₂ no meio agrava significativamente o processo corrosivo, reduzindo os valores de resistência à polarização (Rp) e elevando as taxas de corrosão nos dois materiais.
- O aço AISI 1075 apresentou, de forma geral, melhor desempenho frente à corrosão em comparação ao aço AISI 1070, comportamento atribuído à pequenas variações químicas e formação de filmes passivos mais estáveis.

As micrografias obtidas por microscopia óptica e MEV reforçaram os resultados eletroquímicos, evidenciando maiores índices de oxidação nas superfícies expostas ao CO₂. Ainda, observou-se um incremento da resistência à corrosão ao longo do tempo nos ensaios de LPR, indicando a formação de camadas superficiais que dificultam a troca de carga entre o metal e o meio corrosivo.

No entanto, algumas limitações devem ser consideradas, como o ambiente controlado dos testes, apesar da utilização de água do mar sintética e controle de temperatura, o sistema experimental não reproduz integralmente as condições de operação reais dos risers flexíveis. Além disso, o tempo de exposição foi restrito, o que limita a extrapolação dos resultados para longos períodos de operação em campo.

Dessa forma, este estudo contribui para o entendimento dos mecanismos de corrosão por CO₂ em aços carbono e oferece dados relevantes para a seleção de materiais mais adequados para aplicações em ambientes offshore agressivos.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, A.K. Corrosion Monitoring. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Elsevier, Pages 1698-1701, 2001.
- AL-MOUBARAKI, A. H.; OBOT, I. B. Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook. Journal of Saudi Chemical. v. 25, Issue 12, 2021, Society. Elsevier B.V.
- ARDEBILI, H., MICHAEL, G.P. Chapter 6 - Defect and Failure Analysis Techniques for Encapsulated Microelectronics. In Materials and Processes for Electronic Applications, Encapsulation Technologies for Electronic Applications, Pages 287-350, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ASTM A1040-17(2022): Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ASTM D1141-98(2021): Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.
- BARKER, R. et al. A review of iron carbonate (FeCO₃) formation in the oil and gas industry. Corrosion Science, v. 142, Pages 312-341, 2018.
- BRADFORD, S. A.; Corrosion, Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition). Academic Press, Pages 761-778, 2003.
- CALLISTER, W.D., RETHWISCH, D.G. Ciência e engenharia de materiais : uma introdução. tradução Sergio Murilo Stamile Soares. - 9ª edição - Rio de Janeiro : LTC, 2016.
- CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 6ª edição, ABM, São Paulo, 1988.
- FARELAS, F. et al. Evolution of dissolution process at the interface of carbon steel corroding in a CO₂ environment studied by EIS. Corrosion Science. v. 52, p. 509-2017. 2010.
- FONSECA, V. C. B. Estudo da influência da temperatura do eletrólito na resistência à corrosão das ligas uns s41003 e endur 300 em nacl 500 ppm, 2022.
- GENTIL, V. Corrosão. 3ª edição, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.
- GEOVANA, P. D., ILSON, P. P., BIANCA, C. P., SEGEN, F. E. Pipelines, risers and umbilicals failures: A literature review. Ocean Engineering, v. 148, Pages 412-425, 2018.
- IEA (2023), World Energy Outlook 2023 , IEA, Paris, Licença: CC BY 4.0 (relatório); CC BY NC SA 4.0 (Anexo A)
- LI, X., JIANG, X., HOPMAN, H. A review on predicting critical collapse pressure of flexible risers for ultra-deep oil and gas production, Applied Ocean Research, v. 80, Pages 1-10, 2018.

LIMA, H.N.L.F. Avaliação do comportamento eletroquímico, caracterização microestrutural e mecânica dos aços inoxidáveis fundidos astm a 890 grau 1b e 3a, 2019.

LOMBARDI, CRISTINA C.M. Estudo da influencia da fase ferritica sobre o comportamento de corrosao de acos inoxidaveis austeniticos. Orientador: Lalgudi Venkataraman Ramanathan. 1993. 129 f. Dissertacao (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP, Sao Paulo.

MARQUES, D. A. Efeito do tratamento térmico nas propriedades eletroquímicas e comportamento de corrosão do aço inoxidável classe 410 em solução de cloreto, 2021.

NEŠIĆ, S. Key issues related to modelling of internal corrosion of oil and gas pipelines - A review. *Corrosion Science*, v. 49, n. 12, p. 4308–4338, 2007.

PEREZ, T.E. Corrosion in the Oil and Gas Industry: An Increasing Challenge for Materials. *JOM* 65, 1033–1042 (2013).

PHMSA - Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. U.S. Department of transportation.

RODRIGUES, M.S. Estudo da eficiência de um inibidor à base de amina nos sistemas de CO₂ e CO₂-O₂ em meio contendo cloreto, 2021.

SUN, L., QI, B. Análise global de um riser flexível. *J. Marine. Sci. Appl.* 10 , 478–484 (2011).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza: Biblioteca Universitária, 2013.

XIAO, K. et al. Chapter 18 - Advanced characterization of membrane surface fouling. Elsevier, Pages 499-532, 2022.