



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

LÍVIA SILVA PESSOA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS 1032 E 1035 EM
SOLUÇÃO DE ÁGUA DO MAR SINTÉTICA NA PRESENÇA DE CO₂.**

FORTALEZA-CE, 2025.

LÍVIA SILVA PESSOA

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS 1032 E 1035 EM
SOLUÇÃO DE ÁGUA DO MAR SINTÉTICA NA PRESENÇA DE 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-CE, 2025.

LÍVIA SILVA PESSOA

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS 1032 E 1035 EM
SOLUÇÃO DE ÁGUA DO MAR SINTÉTICA NA PRESENÇA DE 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: 16/12/2025.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. LD. Francisco Belmino
Romero Universidade Federal do
Ceará (UFC)

MsC. Francisco Felipe de Moraes Fideles
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais
que, sob muito sol, me fizeram
chegar até aqui na sombra.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela graça de ingressar na melhor universidade do Ceará e, sobretudo, pelo discernimento, força e constância que me sustentaram até a conclusão desta jornada.

Aos meus pais, Geralda Gomes e Ivan Pessoa, por terem proporcionado a mim e a minhas irmãs todas as oportunidades que lhes foram negadas, e por serem inesgotável fonte de amor e amparo, não apenas neste momento de concretização, mas ao longo de toda a minha existência.

Às minhas irmãs, Luíza Pessoa e Letícia Pessoa, pela paciência, pelo acolhimento e pelo apoio incondicional. Que meu caminho possa inspirá-las a acreditar sempre no esforço, na disciplina e na perseverança.

Aos amigos de graduação, em especial Nivea Pontes e Luís Eduardo Alcântara, pela parceria construída ao longo desses anos e por compartilharem os êxitos e os desafios inerentes a este percurso. Aos meus amigos Sabrina Maria e Marcos Vinicius, pela amizade duradoura e por sempre oferecerem um espaço de escuta generosa, apoio e afeto constante.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC), especialmente à Dra. Ana Aline e à Dra. Roberta Vasques, pela orientação, pelo suporte essencial ao desenvolvimento desta pesquisa e por serem notáveis exemplos de mulheres na ciência e na engenharia.

Ao professor Dr. Walney Silva Araújo, pela oportunidade de desenvolver este trabalho sob sua orientação, pelo apoio contínuo e pela partilha de conhecimento que enriqueceram minha formação acadêmica e científica.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM), e em especial aos técnicos Jorge e Flavio, pelo apoio crucial na preparação e análise dos materiais ensaiados.

À Petrobras, pelo apoio financeiro inicial concedido por meio da bolsa de pesquisa, que viabilizou o desenvolvimento desta investigação.

E, finalmente, aos membros da banca avaliadora, pela dedicação de seu tempo e pela atenção dispensada à análise deste trabalho.

A todos, registro gratidão. Esta conquista é compartilhada com cada um de vocês.

“Aqueles que semeiam com lágrimas, com cantos de alegria colherão. Aquele que sai chorando enquanto lança a semente, voltará com cantos de alegria, trazendo os seus feixes.”
(Salmos 126:5-6)

RESUMO

Os aços carbono representam a classe de materiais de engenharia mais empregada mundialmente, destacando-se como componentes essenciais em estruturas offshore e em sistemas de exploração e transporte de hidrocarbonetos, sobretudo pela elevada eficiência econômica que oferecem. Entretanto, em ambientes marinhos, marcados por elevada salinidade e presença de CO₂, esses materiais ficam sujeitos a intensos processos corrosivos que podem comprometer seriamente a integridade estrutural, tornando indispensáveis estudos que busquem compreender e mitigar tais mecanismos. Esses aços apresentam teor de carbono que pode alcançar aproximadamente 1,5% e contêm elementos como manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S), sendo classificados em aços de baixo ($\leq 0,25\%$), médio (0,25–0,70%) e alto carbono (0,70–1,05%). Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar a resistência à corrosão dos aços AISI 1032 e 1035 em solução sintética de água do mar, conforme a norma ASTM D1141, submetida à dissolução de dióxido de carbono (CO₂) a fim de simular condições típicas do ambiente offshore. Para tal, foram aplicadas técnicas eletroquímicas, incluindo potencial de circuito aberto (OCP), resistência de polarização linear (LPR) e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), complementadas por análise morfológica por microscopia óptica. Os resultados mostraram que, embora apresentassem microestruturas distintas, ambos os materiais exibiram desempenho corrosivo semelhante, indicando que as diferenças microestruturais não afetaram de forma significativa o comportamento frente à corrosão nas condições avaliadas.

Palavras-chave: Corrosão; Aço Carbono; Riser; CO₂; Ensaio eletroquímico.

ABSTRACT

Carbon steels represent one of the most widely used classes of engineering materials worldwide, standing out as essential components in offshore structures and in hydrocarbon exploration and transportation systems, especially due to their high economic efficiency. However, in marine environments, characterized by high salinity and the presence of CO₂, they are subject to intense corrosive processes that can seriously compromise structural integrity, making studies that seek to understand and mitigate such mechanisms indispensable. These steels have a carbon content that can reach approximately 1.5% and contain elements such as manganese (Mn), phosphorus (P), and sulfur (S), being classified as low ($\leq 0.25\%$), medium (0.25–0.70%), and high carbon (0.70–1.05%) steels. Given this scenario, the present study aimed to evaluate the corrosion resistance of AISI 1032 and 1035 steels in a synthetic seawater solution, in accordance with ASTM D1141, subjected to carbon dioxide (CO₂) dissolution under simulated conditions typical of the offshore environment. To this end, electrochemical techniques were applied, including open circuit potential (OCP), linear polarization resistance (LPR), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), complemented by morphological analysis using optical microscopy. The results demonstrated that, although they present distinct microstructures, both materials exhibited similar corrosive performance, indicating that the microstructural differences did not significantly affect their corrosion behavior under the evaluated conditions.

Keywords: Corrosion; Carbon Steel; Riser; CO₂; Electrochemical Testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Camadas em um duto flexível do tipo unbonded.....	14
Figura 2: Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro.	17
Figura 3: Representação das ligas hipoeutetóides no diagrama ferro-carbono.	18
Figura 4: Representações esquemáticas das microestruturas de uma liga ferro-carbono hipoeutetóide, durante seu resfriamento desde a região monofásica de austenita até temperaturas abaixo do ponto eutetóide.....	19
Figura 5: Micrografia de um aço hipoeutetóide com 0,38%pC. Sob uma ampliação de 635x.	20
Figura 6: Diagrama CCT de um Aço Hipoeutetóide.....	21
Figura 7: A microestrutura martensítica em ripas.....	22
Figura 8: Ciclo Metalurgia-Corrosão.	22
Figura 9: Representação Esquemática de uma Célula Eletroquímica.	23
Figura 10: Arranjo submarino de risers.....	25
Figura 11: Camadas do duto flexíveis.....	25
Figura 12: Ilustração esquemática do teste de polarização linear.	26
Figura 13: Circuito elétrico equivalente para um sistema de corrosão.....	27
Figura 14: Diagrama de Nyquist Típico, obtido por (EIE).	27
Figura 15: Microestruturas de: a) Aço AISI 1032 (martensita) a 5000×; b) Aço AISI 1035 (perlita) a 5000×. Ataque químico realizado com nital a 2%.	28
Figura 16: Diagrama representativo de uma célula eletroquímica de 3 eletrodos.....	30
Figura 17: Análise do Potencial de Circuito Aberto (OCP) nos aços AISI 1032 e AISI 1035.	32
Figura 18: Gráficos de resistência à polarização linear (LPR) para os aços AISI 1032 e 1035.	33
Figura 19: Superfície das amostras antes (1) e depois (2) da exposição ao teste LPR.....	35
Figura 20: Diagrama de Nyquist para AISI 1032 e 1035.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química dos aços AISI 1032 e 1035 (% em peso).....	28
Tabela 2: Valores de resistência à polarização (R_p) obtidos nos ensaios de polarização linear aos 5 minutos, 1 hora, 2 horas e 3 horas.....	34
Tabela 3: Valores de resistência à polarização (R_p) obtidos a partir dos ensaios de EIE.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

β_a	Coeficiente de Tafel anódico
β_c	Coeficiente de Tafel catódico
CO ₂	Dióxido de carbono
EIE	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica
FeCO ₃	Carbonato de ferro
Fe	Ferro
H ₂ CO ₃	Ácido carbônico
icorr	Densidade de corrente de corrosão
Ecorr	Potencial de corrosão
OCP	Potencial de Circuito Aberto (Open Circuit Potential)
°C	Grau Celsius
mL	Mililitro
Ag/AgCl	Eletrodo de referência de prata/cloreto de prata
Z	Impedância eletroquímica total
Z'	Parte real da impedância
Z''	Parte imaginária da impedância
Rp	Resistência de polarização
f	Frequência
Hz	Hertz
V	Volt
mV	Milivolt
A/cm ²	Ampere por centímetro quadrado

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	OBJETIVO	16
2.1.	Objetivo Geral	16
2.2.	Objetivos Específicos	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1.	Aços Carbono	17
3.2.	Aços Hipoeutetóide	18
3.3.	Microestrutura dos aços hipoeutetóides.....	19
3.4.	Corrosão Metálica	22
3.5.	Aços em Ambientes Marítimos	24
3.6.	Técnicas de Monitoramento e Avaliação da Corrosão.....	25
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1.	Preparo das amostras	28
4.2.	Preparo das soluções.....	29
4.3.	Preparação superficial das amostras	29
4.4.	Esquema Experimental	29
4.5.	Ensaio eletroquímico	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1.	Potencial de Circuito Aberto (OCP).....	31
5.2.	Resistência de Polarização Linear (LPR).....	32
5.3.	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE).....	35
6.	CONCLUSÃO.....	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

O aço carbono é a classe de material mais utilizada no mundo, empregado amplamente em aplicações estruturais e industriais devido à sua combinação de propriedades mecânicas adequadas e custo acessível (Chiaverini, 2005). Contudo, o aço carbono é particularmente suscetível à degradação em ambientes agressivos, sendo que aproximadamente 20% da produção mundial é destinada à reposição de perdas causadas pela corrosão (Frauches-Santos et al., 2014).

A corrosão é um processo natural e espontâneo que causa a deterioração de materiais metálicos pela interação química ou eletroquímica com o meio ambiente, podendo ou não estar associada a esforços mecânicos (Gentil, 2011). Este fenômeno representa um desafio crítico em diversos setores industriais, resultando em falhas estruturais, perdas de equipamentos e custos globais anuais que atingem a casa dos trilhões de dólares (Luiz et al., 2020).

A indústria de petróleo e gás opera em um ambiente de alta complexidade e risco, onde a integridade dos equipamentos é fundamental para a segurança e a sustentabilidade das operações (Offshore Center Danmark, 2010). Nesse cenário, a degradação dos materiais por fenômenos como a corrosão é uma preocupação constante. Os custos globais anuais da corrosão totalizam 2,5 trilhões de dólares americanos, sendo que falhas por corrosão são responsáveis por aproximadamente 25% de todos os incidentes de segurança na indústria do petróleo (Kermani & Morshed, 2003). A escolha de materiais adequados, que resistam às condições agressivas de operação, é, portanto, uma etapa crítica no desenvolvimento de tecnologias para esse setor.

Conforme Li, Jiang e Hopman (2021), o riser flexível é um elemento fundamental para a produção de petróleo e gás em águas ultraprofundas, transportando fluidos de produção entre sistemas flutuantes de produção e poços submarinos.

Figura 1: Camadas em um duto flexível do tipo unbonded.



Fonte: Adaptado de Mac et. al (2018).

Essa composição é projetada para garantir a integridade e o desempenho sob condições de águas ultraprofundas, com cada camada cumprindo uma função especializada. De acordo com Bai e Bai (2018), para resistir às forças externas e internas, existem camadas estruturais de reforço: a armadura de pressão, feita de aço carbono, é responsável por suportar a pressão circunferencial, enquanto a carcaça, geralmente de aço inoxidável, oferece resistência fundamental à pressão externa. Adicionalmente, a armadura de tração, também de aço carbono, tem a função de resistir à carga de tração imposta ao sistema.

O espaço anular dos risers flexíveis, onde estão estrategicamente posicionadas as armaduras de tração e as armaduras de pressão em camadas sobrepostas, é uma região de criticidade elevada, pois nesse ambiente confinado o material metálico está sujeito à falha devido a danos estruturais causados por corrosão, como os fenômenos de fragilização por sulfetos (ABREU, 2021).

Essa degradação é intensificada quando gases como o CO₂ permeiam ou inundam o espaço anular. Estes gases podem reagir com o ferro (Fe) presente nas armaduras de tração, resultando nos principais produtos de corrosão, que, como citado por Campos et al. (2019), são o íon ferroso (Fe²⁺) e os íons carbonato e bicarbonato.

Dada a criticidade da resistência à tração e a complexidade das cargas operacionais, a integridade de dutos e componentes metálicos é vital. Os aços AISI 1032 e AISI 1035 enquadram-se na categoria de aços de médio teor de carbono. Aços com porcentagem de carbono entre 0,2% e 0,5%, considerados de médio carbono são valorizados por sua combinação de tenacidade, ductilidade, resistência mecânica e dureza, sendo amplamente utilizados na fabricação de forjados e tubos (Meneses et al., 2019).

A compreensão do processo corrosivo é fundamental para a seleção de aços e desenvolvimento de novos materiais para aplicação na indústria de petróleo, especialmente considerando que condições de operação e exploração são cada vez mais críticas. Neste contexto, há grande interesse de obtenção de dados de corrosão em condições que simulem alta severidade de corrosão.

Portanto, este trabalho busca preencher essa lacuna, investigando o comportamento dos aços hipoeutetoides, AISI 1032 e AISI 1035, submetidos a ambientes corrosivos com alto teor de CO₂. Através de uma análise aprofundada de suas propriedades e de sua resposta à corrosão.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a resistência à corrosão aços AISI 1032 e 1035 em solução sintética de água do mar com dióxido de carbono (CO_2).

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a composição química e a microestrutura dos aços AISI 1032 e AISI 1035 para estabelecer correlações entre suas características e o comportamento corrosivo.
- Investigar o comportamento eletroquímico dos aços em solução sintética de água do mar saturada com CO_2 utilizando técnicas de Potencial de Circuito Aberto (OCP), Resistência à Polarização Linear (LPR) e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE).
- Determinar as taxas de corrosão dos materiais.
- Avaliar a superfície das amostras antes e após a exposição ao ensaio corrosivo, utilizando microscopia óptica.

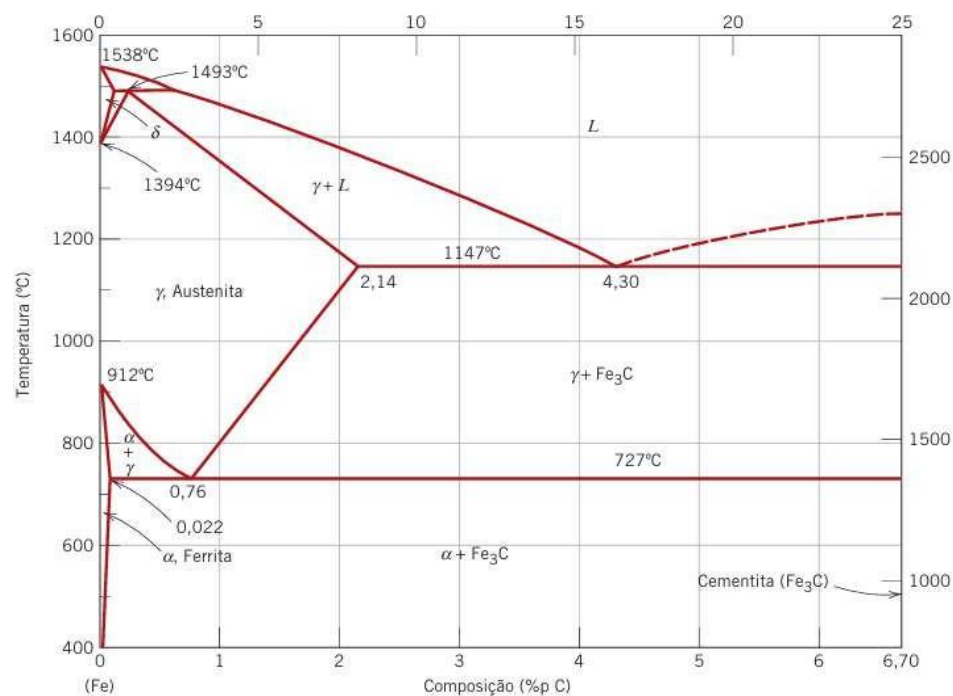
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aços Carbono

Segundo Callister (2018), o aço é fundamentalmente caracterizado como uma liga de ferro-carbono que possui um teor de carbono, em peso, que se situa no intervalo entre 0,008% e aproximadamente 2,11%. Este limite superior de carbono (2,11%) define o ponto de transição crucial que distingue o aço dos ferros fundidos, os quais contêm teores de carbono superiores a esse percentual. De modo complementar, o teor inferior (0,008%) estabelece a distinção em relação aos ferros comercialmente puros.

De forma mais específica, o aço-carbono é uma classe dessa liga, sendo composto predominantemente por ferro e carbono, além de concentrações residuais de outros elementos, tais como manganês, silício, enxofre e fósforo, provenientes do processo de refino.

Figura 2: Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro.



Fonte: Callister, 2016.

Corroborando essa perspectiva, Chiaverini (2015) também define o aço primariamente como uma liga de ferro e carbono que, em decorrência do processo de fabricação, pode incorporar quantidades residuais de outros elementos.

Os aços podem ser agrupados em diferentes categorias conforme sua composição química elementos de liga presentes. Um dos critérios mais tradicionais de classificação é o teor de carbono, que influencia diretamente as propriedades e aplicações.

Chiaverini também destaca que os aços-carbono são categorizados de acordo com a porcentagem de carbono presente em sua composição. Essa classificação define três tipos

fundamentais:

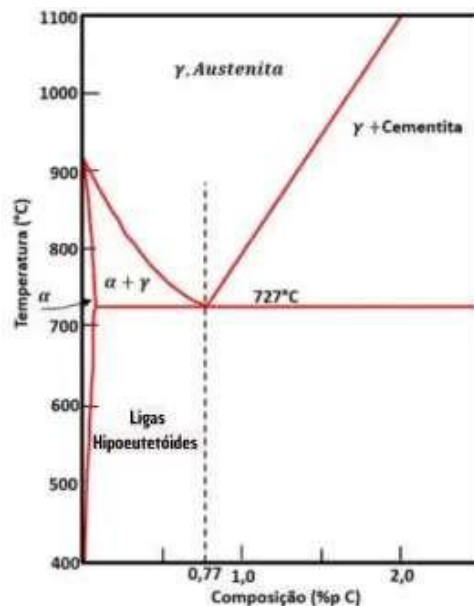
- Aço de baixo teor de carbono, que contém menos de 0.2% de carbono;
- Aço de médio teor de carbono, com um teor de carbono entre 0.2% e 0.5%;
- Aço de alto teor de carbono, que apresenta mais de 0.5% de carbono.

É relevante notar que o teor de carbono de 2.11% é o ponto de separação entre os aços e os ferros fundidos no diagrama de equilíbrio.

3.2. Aços Hipoeutetóide

De acordo com Costa e Silva e Mei (2006), os aços hipoeutetóides constituem uma classe de aços-carbono cujo teor de carbono é inferior ao ponto eutetóide do sistema ferro-carbono, localizado aproximadamente em 0,77% em massa.

Figura 3: Representação das ligas hipoeutetóides no diagrama ferro-carbono.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O sistema de ligas ferro-carbono constitui a base fundamental para a classificação dos aços sendo o teor de carbono o parâmetro predominante na determinação de suas propriedades mecânicas e de sua microestrutura. O ponto eutetóide, localizado a 727 °C (linha A₁), corresponde exatamente à composição de 0,77% de carbono. Essa composição, que define o ponto eutetóide no diagrama de equilíbrio, estabelece o limite metalúrgico entre os aços hipoeutetóides e hipereutetóides, determinando o comportamento das transformações de fase e a evolução microestrutural durante o resfriamento. (Callister, 2016)

Dessa forma, cada classe de aço apresenta características metalúrgicas específicas, diretamente decorrentes da sua composição e das transformações de fase que ocorrem tanto no resfriamento quanto em tratamentos térmicos subsequentes.

3.3. Microestrutura dos aços hipoeutetóides

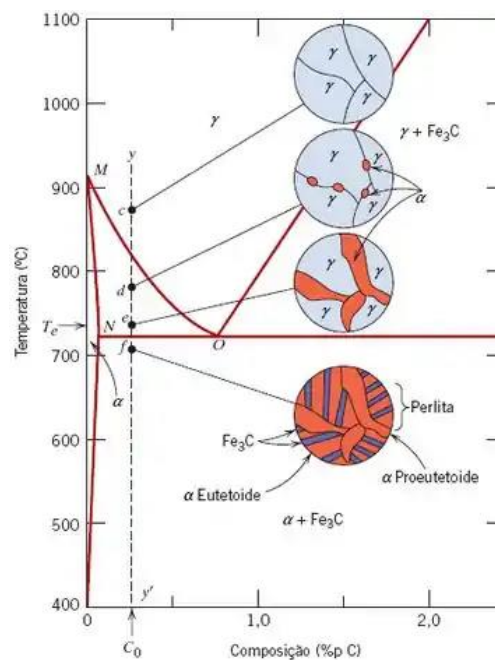
3.3.1. Transformação perlítica

Conforme Callister (2016), uma liga ferro-carbono cuja composição se situa à esquerda do ponto eutetóide, é classificada como hipoeutetóide. Durante o resfriamento dessa liga, representado pelo deslocamento vertical para baixo ao longo da linha yy' na Figura 4, observa-se uma sequência definida de transformações microestruturais.

A cerca de 875 °C (ponto c), a microestrutura é constituída exclusivamente por grãos de austenita (γ). À medida que a temperatura diminui e atinge aproximadamente 775 °C (ponto d), o material ingressa na região bifásica $\alpha + \gamma$, na qual ferrita (α) e austenita passam a coexistir. Nesse estágio, as primeiras partículas de ferrita, tipicamente formadas ao longo dos contornos dos grãos de austenita, começam a se precipitar.

Callister (2016) afirma que, durante o prosseguimento do resfriamento dentro do campo $\alpha + \gamma$, a composição da ferrita evolui ligeiramente, tornando-se gradualmente mais rica em carbono ao longo da linha de equilíbrio $\alpha-(\alpha+\gamma)$, identificada como MN no diagrama. A austenita residual, por sua vez, experimenta um enriquecimento mais acentuado de carbono, deslocando-se ao longo da fronteira $(\alpha+\gamma) - \gamma$, designada como linha MO, até se aproximar do teor eutetóide.

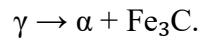
Figura 4: Representações esquemáticas das microestruturas de uma liga ferro-carbono hipoeutetóide, durante seu resfriamento desde a região monofásica de austenita até temperaturas abaixo do ponto eutetóide.



Fonte: Callister, 2016.

Ao atingir temperaturas imediatamente acima do eutetóide (ponto e), a liga apresenta maior fração volumétrica de ferrita, cujas partículas tornam-se maiores devido ao crescimento associado ao estágio de resfriamento anterior.

Quando a temperatura é reduzida para valores imediatamente inferiores ao eutetóide (ponto f), toda a austenita remanescente com composição eutetóide transforma-se em perlita, conforme a reação eutetóide:

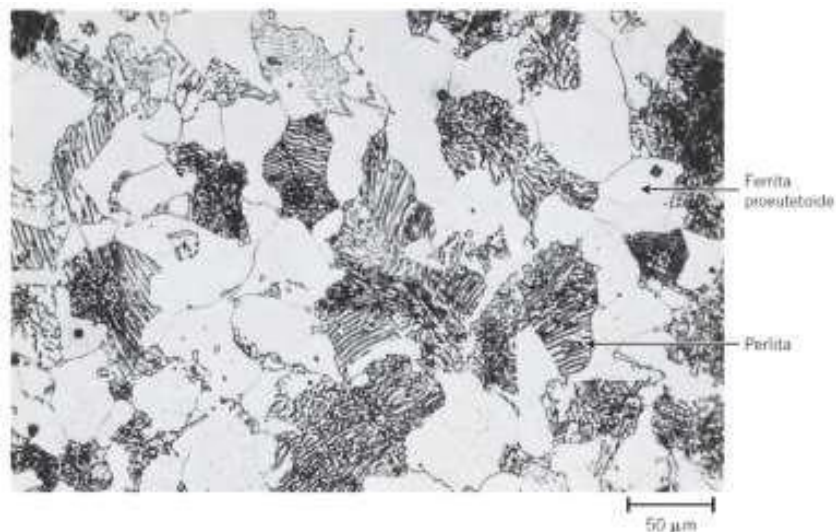


Essa transformação ocorre de maneira abrupta e simultânea, produzindo um arranjo lamelar de ferrita e cementita (Fe_3C). A ferrita que já existia antes da reação eutetóide, permanece praticamente inalterada ao atravessar essa temperatura, constituindo a matriz contínua que envolve as colônias perlíticas. Essa ferrita é denominada ferrita pró-eutetóide, ao passo que a ferrita presente na perlita é chamada de ferrita eutetóide.

De acordo com a descrição de Callister (2016), a microestrutura observada em um aço hipoeutetóide lentamente resfriado abaixo da temperatura eutetóide é, portanto, composta por dois microconstituintes fundamentais: ferrita pró-eutetóide, que se forma nos estágios iniciais de resfriamento, e perlita, que surge da transformação da austenita eutetóide.

A Figura 5 demonstra esse comportamento em um aço contendo 0,38 %p C, no qual as regiões grandes e claras correspondem à ferrita pró-eutetóide, enquanto a perlita se apresenta com variações de contraste decorrentes do espaçamento lamelar.

Figura 5: Micrografia de um aço hipoeutetóide com 0,38%pC. Sob uma ampliação de 635x.

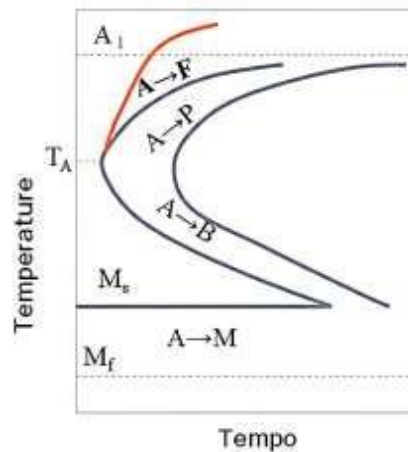


Fonte: Callister, 2016.

3.3.2. Transformação martensítica

Em nítido contraste com as transformações por difusão descritas, um aumento na taxa de resfriamento introduz um forte fator cinético que inibe o rearranjo atômico. Quando a taxa de resfriamento atinge a velocidade crítica, um processo conhecido como têmpera, a difusão do carbono é suprimida, prevenindo a formação de perlita e ferrita (Porter & Easterling, 1992). Atingir e ultrapassar esta velocidade crítica é condição analisada nos diagramas de Resfriamento Contínuo-Transformação (CCT), apresentada na figura 6.

Figura 6: Diagrama CCT de um Aço Hipoeutetóide.



Fonte: Adaptado de Compraco, 2024.

A martensita se forma quando a liga ferro-carbono é submetida a um resfriamento abrupto, impossibilitando as transformações que ocorrem em condições de resfriamento lento. Segundo Callister (2016), esse microconstituente surge quando as ligas são previamente austenitizadas e, em seguida, resfriadas de maneira extremamente rápida (temperadas) até temperaturas relativamente baixas, próximas à temperatura ambiente. A formação da estrutura martensítica ocorre quando a taxa de resfriamento é suficientemente elevada para impedir qualquer difusão apreciável do carbono.

A transformação martensítica é um processo de reorientação cristalográfica (também conhecido como transformação por cisalhamento). Esse mecanismo converte a austenita, que possui uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), em martensita, que adquire uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC).

Todo o carbono presente na martensita permanece em solução sólida intersticial, originando uma solução supersaturada e termodinamicamente instável, suscetível à decomposição quando submetida a temperaturas que possibilitem a difusão atômica. Ainda assim, diversos aços conseguem reter essa estrutura quase indefinidamente à temperatura ambiente (Callister, 2016).

Microestruturalmente, em aços hipoeutetóides, a martensita caracteriza-se por uma morfologia típica em ripas, como mostrado na figura 7. Ademais, por se tratar de uma fase fora do equilíbrio, a martensita não é representada no diagrama de fases ferro-carbono.

Figura 7: A microestrutura martensítica em ripas.



Fonte: Callister, 2016.

As ripas é a martensita e a região clara é a austenita que não se transformou durante o resfriamento. A ampliação é de 1220x.

3.4. Corrosão Metálica

Segundo Fontana (1986) a corrosão é definida como a deterioração destrutiva e indesejável de um material, geralmente metálico, devido à sua reação química ou eletroquímica com o meio ambiente.

Sua ocorrência é impulsionada pela tendência termodinâmica inerente ao metal de retornar a um estado de menor energia. Este estado, tipicamente na forma de óxidos, assemelha-se ao composto encontrado na natureza antes da aplicação da metalurgia extrativa, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Ciclo Metalurgia-Corrosão.



Fonte: Gerhard, 2016.

3.4.1. Corrosão Eletroquímica

Segundo Callister (2016), para os materiais metálicos, o processo de corrosão é tipicamente de natureza eletroquímica, o que implica uma reação química caracterizada pela transferência de elétrons entre diferentes espécies químicas. Os átomos metálicos possuem a tendência de perder ou ceder elétrons, sendo este fenômeno denominado oxidação.

A reação de oxidação pode ser genericamente representada da seguinte forma, onde M é um metal hipotético e n é sua valência: em que M se torna um íon carregado positivamente M^{n+} , que nesse processo perde seus n elétrons de valência; e^- é usado para simbolizar um elétron.

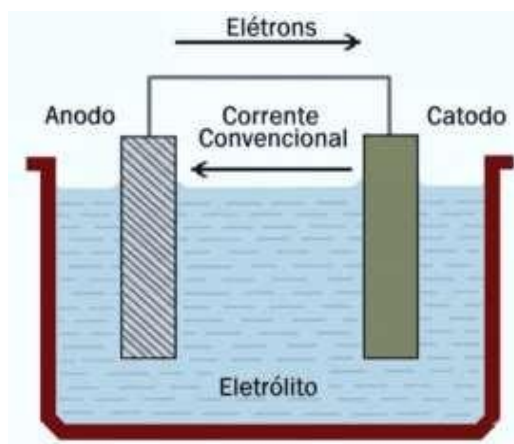


A seguir, apresentam-se um exemplos de oxidação de metais:



A região onde a oxidação ocorre é denominada ânodo, sendo a oxidação referida como reação anódica. Em contrapartida, a semirreação que consome os elétrons liberados pelo ânodo é denominada redução e ocorre na região do cátodo. A corrosão eletroquímica, portanto, é um processo de oxirredução acoplado, no qual a perda de metal no ânodo só prossegue se houver o consumo de elétrons no cátodo. A Figura 9 apresenta uma representação esquemática.

Figura 9: Representação Esquemática de uma Célula Eletroquímica.

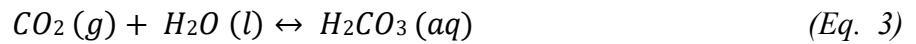


Fonte: Adaptado de Gentil, 2011.

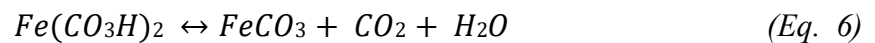
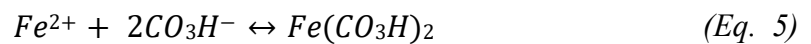
3.4.2. Corrosão induzida por CO_2

A corrosão induzida por dióxido de carbono (CO_2), constitui, de acordo com Perez (2013), a forma mais recorrente de deterioração em sistemas de produção de petróleo e gás. Embora o CO_2 anidro não apresente caráter corrosivo para aços e ligas sob condições convencionais de fundo de poço, sua dissolução na água promove a formação de ácido carbônico, resultando em taxas elevadas de corrosão, especialmente quando há ocorrência de ataque localizado.

Além disso, os fluidos produzidos em poços de petróleo e gás podem conter quantidades significativas de CO_2 , o qual se dissolve na fase aquosa formando ácido carbônico (Eq. 3).



Perez (2013) afirma que durante esse processo, pode ocorrer a precipitação de carbonato de ferro ($FeCO_3$), desde que seu limite de solubilidade seja atingido, fenômeno influenciado pelo pH, pela pressão parcial de CO_2 e pela temperatura. Esse precipitado pode atuar como uma camada protetora, embora sua ruptura parcial favoreça a corrosão localizada.



Além disso, o ataque corrosivo por CO_2 pode apresentar morfologia uniforme ou manifestar-se como corrosão localizada. A severidade do processo depende, sobretudo, da formação, estabilidade e capacidade de regeneração da camada de produtos de corrosão.

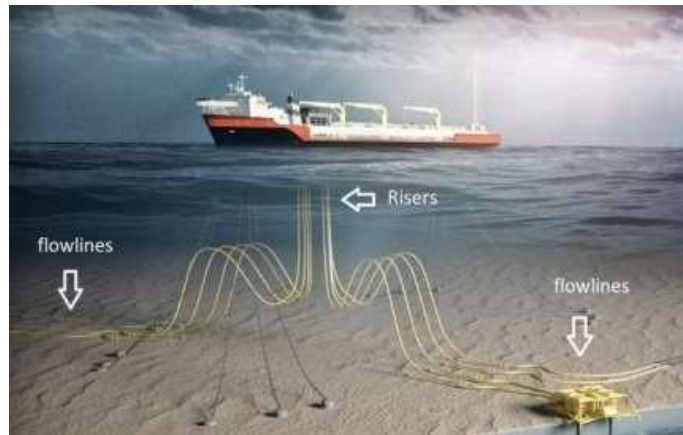
3.5. Aços em Ambientes Marítimos

Os aços carbono, apesar de serem economicamente competitivos e apresentarem vantagens em termos de propriedades mecânicas, demonstram uma vulnerabilidade significativa quando expostos a ambientes agressivos offshore. Esta elevada suscetibilidade à corrosão é um fator que limita diretamente sua aplicação, exigindo a obrigatoriedade de estratégias de proteção adicionais, como revestimentos protetores, sistemas de proteção catódica e controle rigoroso das condições de operação. Portanto, a aplicabilidade em sistemas submarinos está intrinsecamente ligada à eficácia dessas medidas mitigadoras (Pontes, 2025).

3.5.1. Risers Flexíveis

Conforme Chandrasekaran (2021), os risers submarinos são condutos essenciais para o transporte de petróleo bruto, cujo projeto é complexo devido à necessidade de suportar tensões extremas geradas por cargas ambientais (ondas, correntes, etc.). O avanço tecnológico introduziu diversas geometrias, como os risers flexíveis, risers catenários de aço e risers híbridos, todos projetados para suportar tensão axial e flexão, mantendo a flexibilidade para resistir à fadiga. Esses dutos são demonstrados na Figura 10.

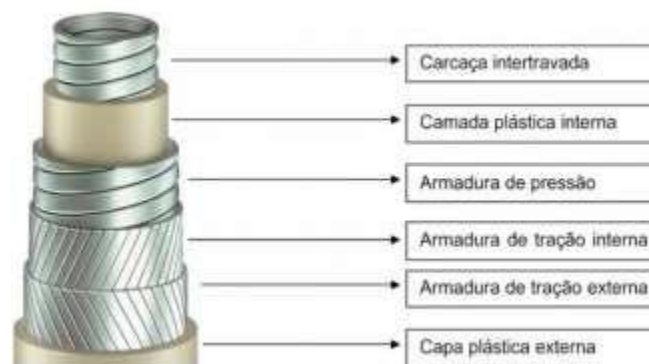
Figura 10: Arranjo submarino de risers.



Fonte: Carneiro, 2016.

As camadas constituintes dos risers estão detalhadamente ilustradas na Figura 11. A escolha por aços carbono em risers de sistemas offshore deve-se, primordialmente, à sua combinação de elevada resistência à tração, excelente soldabilidade e notável capacidade de conformação (ALEXANDER E OCHOA, 2020). Tais atributos são cruciais, especialmente para os arames de tração que compõem a estrutura dos risers flexíveis, pois asseguram que o conjunto resista de maneira eficaz às severas solicitações mecânicas resultantes das forças dinâmicas do ambiente marinho. A figura 11 detalha as camadas presentes em risers.

Figura 11: Camadas do duto flexíveis.



Fonte: Adaptado de Carneiro, 2016.

3.6. Técnicas de Monitoramento e Avaliação da Corrosão

3.6.1. Potencial de Circuito Aberto (OCP)

De acordo com Jimenez et al. (2009), o Potencial de Circuito Aberto (OCP) pode ser definido como o potencial de um material em uma solução aquosa, sob condições nas quais não há indução de corrente ou potencial externo no sistema.

Este potencial, é uma função direta da reatividade inerente do metal e do poder de

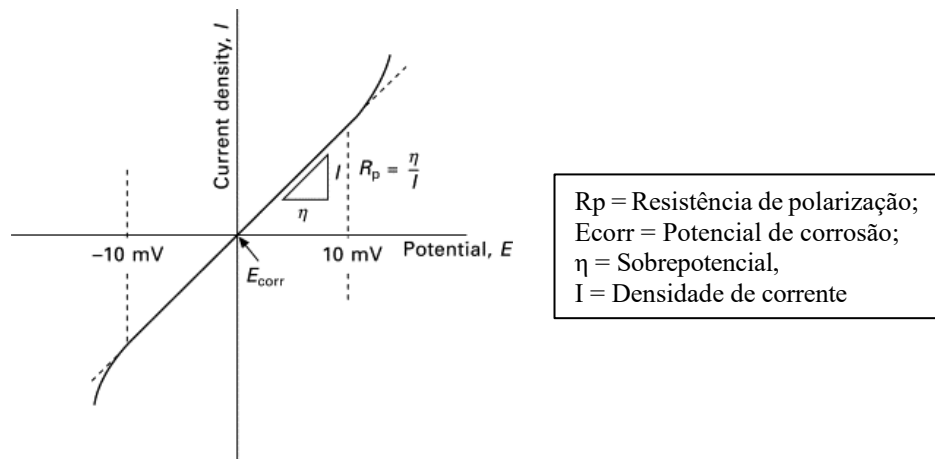
oxidação da solução. O valor do OCP é, portanto, um parâmetro crucial que sinaliza a tendência termodinâmica do material em sofrer reações de oxidação no meio agressivo.

O monitoramento do OCP constitui uma das análises mais simples na eletroquímica. Entretanto, sua aplicação exige a utilização de um eletrodo de referência estável, garantindo que quaisquer variações do potencial observadas ao longo do tempo sejam atribuídas unicamente aos eventos que ocorrem na interface metal-solução (Queiroz, 2021).

3.6.2. Resistência de Polarização Linear (LPR)

Segundo Hiromoto (2019), a resistência de polarização (R_p), que está diretamente relacionada à resistência do material à corrosão, é obtida por meio do método da resistência de polarização linear. A Figura 12 ilustra a relação mencionada. Neste método, a corrente estabelece uma dependência linear com o potencial em uma região estreita em torno do potencial de corrosão (E_{corr}), geralmente no intervalo de $E_{corr} \pm 10\text{mV}$.

Figura 12: Ilustração esquemática do teste de polarização linear.



Fonte: Adaptado de Hiromoto, 2019.

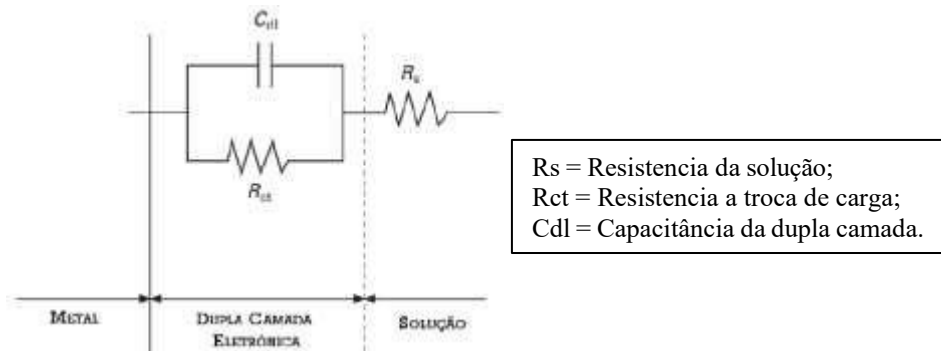
3.6.3. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE):

De acordo com Hiromoto (2019), os ensaios de EIE são realizados mediante a imposição de um potencial que se alterna, com uma pequena amplitude de variação, sobre um potencial predefinido. A frequência desta variação percorre uma ampla região de valores, tipicamente na faixa de 1 MHz até 1 mHz. Devido à amplitude de variação ser intrinsecamente baixa, a perturbação do sistema em análise é considerada insignificante.

O sistema de corrosão em questão é, então, simulado através de um circuito elétrico equivalente. A estrutura deste circuito é ajustada em função das particularidades de cada sistema eletroquímico, visando acomodar os resultados experimentais e aprimorar a confiabilidade da simulação. (HIROMOTO, 2019). A Figura 13 ilustra um exemplo de circuito elétrico

equivalente para um sistema de corrosão simples.

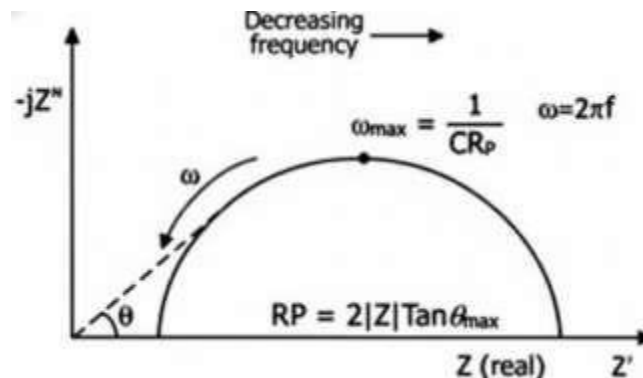
Figura 13: Circuito elétrico equivalente para um sistema de corrosão.



Fonte: Adaptado de Hiromoto, 2019.

A partir do circuito equivalente, torna-se possível o cálculo da impedância (Z), que é um número complexo separado em uma parcela real e uma parcela imaginária. Com a obtenção do gráfico de impedância real (Z') versus impedância imaginária (Z''), temos o Diagrama de Nyquist, como é apresentado na figura 14. Assim, é possível inferir informações críticas, tais como a resistência à polarização (R_p), a qual está diretamente relacionada à resistência do material à corrosão. (HIROMOTO, 2019).

Figura 14: Diagrama de Nyquist Típico, obtido por (EIE).



Fonte: Adaptado de Ahmad, 2006.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

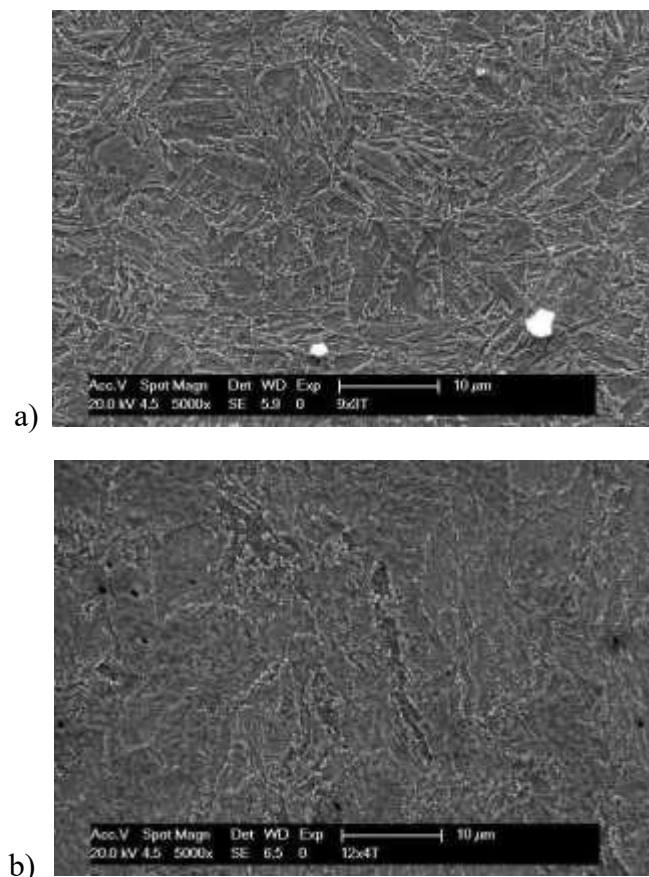
Para esta pesquisa, foram utilizados aços carbono dos tipos AISI 1032 e 1035. A composição química exata de cada um, que atende aos requisitos da norma ASTM A1040, pode ser consultada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química dos aços AISI 1032 e 1035 (% em peso).

AISI	%C	%Mn	%Si	%Al	%P	%S	%Fe
1032	0,321	0,76	0,214	0,021	0,011	0,001	Bal
1035	0,351	0,735	0,217	0,034	0,015	0,004	Bal

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 15: Microestruturas de: a) Aço AISI 1032 (martensita) a 5000×; b) Aço AISI 1035 (perlita) a 5000×. Ataque químico realizado com nital a 2%.



4.1. Preparo das amostras

Para a preparação dos eletrodos de trabalho, as amostras foram inicialmente seccionadas nas dimensões especificadas, garantindo uniformidade entre os corpos de prova. Em

seguida, procedeu-se à fixação de um condutor elétrico de cobre a cada peça, assegurando o contato elétrico necessário para as etapas subsequentes de análise. Após essa etapa, as amostras foram embutidas em resina acrílica, visando proporcionar suporte mecânico adequado e facilitar o manuseio durante os processos de preparação superficial das amostras.

4.2. Preparo das soluções

A solução foi preparada de acordo com os procedimentos especificados na norma ASTM D1141-98, utilizando sais reagentes: NaCl, MgCl₂.6H₂O, Na₂SO₄, CaCl₂, KCl, NaHCO₃, KBr, H₃BO₃, SrCl₂, NaF. Que estabelece a composição e o método de preparo de soluções salinas artificiais para ensaios laboratoriais. Posteriormente, pelo menos trinta minutos antes do ensaio, realizou-se o ajuste do pH para $8,2 \pm 0,1$, empregando solução de NaOH 0,1 M, de modo a reproduzir as condições alcalinas características de ambientes marinhos naturais e assegurar a reprodutibilidade dos ensaios eletroquímicos.

4.3. Preparação superficial das amostras

O preparo superficial das amostras foi realizado por meio de lixamento sequencial, utilizando lixas de granulometria 220, 320, 400, 600 e 1200, em ordem crescente de refinamento. Em seguida, as amostras foram limpas com álcool e submetidas à secagem com auxílio de um fluxo de ar aquecido. Posteriormente, aplicou-se uma camada isolante nas bordas, a fim de uniformizar a delimitação das áreas destinadas à avaliação. Antes da realização dos ensaios, foram registradas imagens das superfícies, com o objetivo de possibilitar a comparação posterior com o estado final após as análises.

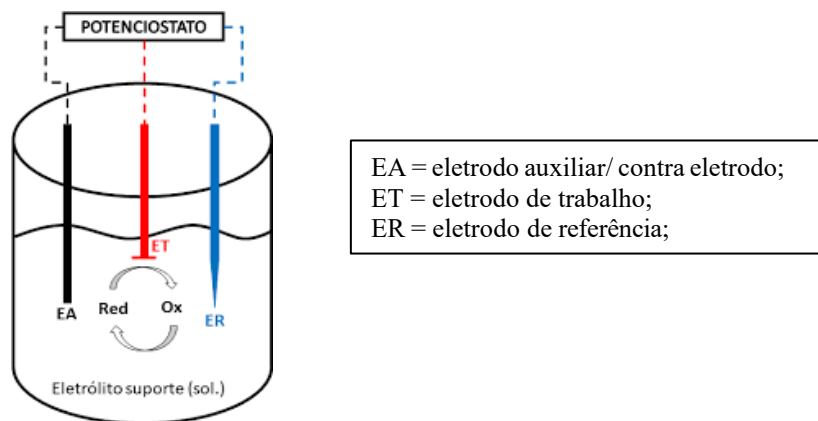
4.4. Esquema Experimental

- **Célula eletroquímica:** A célula eletroquímica foi montada com três eletrodos: o eletrodo de trabalho, com área superficial de 0,299035 mm², constituído pelas amostras de aço AISI 1032 e AISI 1035 previamente encapsuladas; o eletrodo de referência de prata-cloreto de prata (Ag/AgCl) em solução de KCl 3 M; e o contra eletrodo de platina, com área de 2 cm², garantindo condições adequadas para a realização dos ensaios eletroquímicos. A Figura 16 contém um diagrama representativo que auxilia na visualização e entendimento do processo.
- **Controle de Temperatura:** A temperatura da célula foi mantida em $40 \pm 0,5$ °C durante todo o experimento, garantindo estabilidade térmica.
- **Volume da Solução:** O volume da solução eletrolítica empregado foi de 100 mL.
- **Controle Atmosférico:** Para o controle atmosférico, a solução eletrolítica foi inicialmente purgada com gás nitrogênio (N₂) por 15 minutos, seguida de uma purga adicional com gás carbônico (CO₂) pelo mesmo período, garantindo condições adequadas para a

realização dos ensaios eletroquímicos. Durante todo o experimento, o fluxo de CO₂ foi mantido de forma contínua na célula, porém sem contato direto com a solução, sendo direcionado para o interior da célula sem borbulhar no eletrólito. Essa abordagem permitiu a manutenção de uma atmosfera enriquecida em CO₂, sem induzir perturbações mecânicas na solução.

Para este volume de solução, foram realizados testes experimentais com medição de oxigênio a fim de validar que, após os procedimentos de desaeração com nitrogênio e saturação com CO₂, apenas o dióxido de carbono estivesse presente na solução.

Figura 16: Diagrama representativo de uma célula eletroquímica de 3 eletrodos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.5. Ensaios eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos foram conduzidos e monitorados utilizando um potenciostato modelo PGSTAT 30 (Autolab, Metrohm Brasil), acoplado ao software NOVA, versão 2.1, empregado para aquisição, controle e processamento dos dados obtidos durante os experimentos.

4.5.1. *Potencial de Circuito Aberto (OCP)*

Previamente ao início dos ensaios eletroquímicos, os corpos de prova foram imersos na solução eletrolítica com o propósito de promover a estabilização do potencial de circuito aberto (OCP). Esta etapa foi conduzida por um período mínimo de uma hora, assegurando que as reações eletroquímicas na interface eletrodo/solução atingissem condições de equilíbrio. A monitoração contínua do OCP permitiu avaliar de forma precisa o comportamento inicial da superfície metálica em contato com o meio corrosivo, estabelecendo um parâmetro de referência fundamental para os experimentos subsequentes.

4.5.2. Resistência à Polarização Linear (LPR)

A técnica de Resistência à Polarização Linear (LPR) foi empregada para avaliar a taxa de corrosão das amostras metálicas e investigar o comportamento do filme passivo na superfície do material. As medições foram realizadas após a estabilização do potencial de circuito aberto (OCP), utilizando uma amplitude de $\pm 15\text{mV}$ e uma velocidade de medição de 1 mV/s . O ensaio foi conduzido em diferentes tempos, especificamente após 5 minutos, 1 hora, 2 horas e 3 horas, permitindo acompanhar a evolução do filme passivo. Os dados obtidos foram utilizados para calcular a resistência à polarização (R_p), fornecendo informações quantitativas sobre a suscetibilidade à corrosão localizada e a estabilidade do filme protetor, com processamento realizado por meio do software NOVA.

4.5.3. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

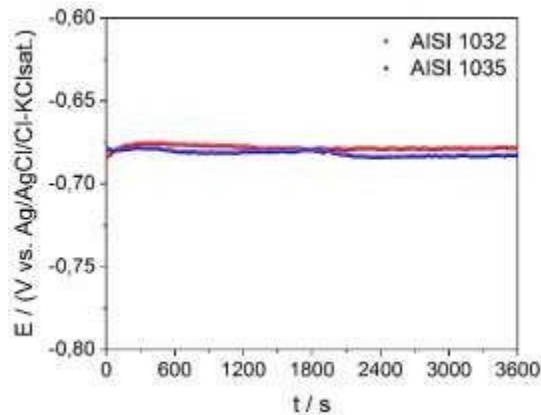
A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foi utilizada para investigar a resistência à corrosão das amostras metálicas, bem como para analisar as características da interface entre eletrodo e solução. As medições foram realizadas após a estabilização do potencial de circuito aberto (OCP), aplicando-se uma pequena perturbação senoidal de 10 mV ($0,01\text{ VRMS}$) sobre o OCP, abrangendo uma faixa de frequência de 10^5 a 10^{-2} Hz , com aquisição de cinco pontos por década. Os resultados foram representados em diagramas de Nyquist, e os parâmetros eletroquímicos relevantes foram obtidos por ajuste em modelos de circuitos equivalentes, utilizando-se o software NOVA.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Potencial de Circuito Aberto (OCP)

A análise do Potencial de Circuito Aberto (OCP) constitui uma etapa fundamental para a avaliação do comportamento eletroquímico espontâneo de materiais metálicos. No gráfico apresentado na Figura 17, são ilustrados os perfis de OCP em função do tempo para dois aços com teores de carbono distintos, AISI 1032 e AISI 1035, quando expostos a ambientes contendo dióxido de carbono (CO_2).

Figura 17: Análise do Potencial de Circuito Aberto (OCP) nos aços AISI 1032 e AISI 1035.



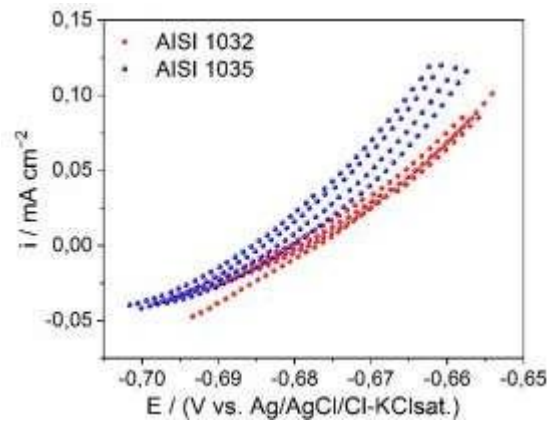
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O ensaio de OCP demonstra que, sob as condições de água do mar sintética saturada com CO_2 a 40°C , ambos os aços, AISI 1032 (martensítico) e AISI 1035 (perlítico), se comportam de forma eletroquimicamente muito similar, estabilizando-se em potenciais ativos e quase idênticos (cerca de $-0,68\text{ V}$). Isso sugere que, para estes aços carbono neste meio corrosivo específico, a microestrutura não é o fator preponderante na determinação do potencial de corrosão.

5.2. Resistência de Polarização Linear (LPR)

O gráfico, que ilustra a região da Resistência à Polarização Linear (LPR) do ensaio potenciodinâmico, fornece a confirmação visual da cinética de corrosão dos aços no ambiente de água do mar sintética saturada com CO_2 a 40°C .

Figura 18: Gráficos de resistência à polarização linear (LPR) para os aços AISI 1032 e 1035.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Embora o aço AISI 1032, com sua microestrutura martensítica, apresente uma inclinação da curva sutilmente menos acentuada que a do AISI 1035, perlítico, a diferença é irrelevante em termos de significado experimental. Tal conclusão é confirmada pela análise dos valores numéricos contidos na Tabela 2.

Conforme ilustrado na Figura 12, o valor da resistência de polarização (R_p) é definido pela inclinação da porção linear da curva tensão-corrente da técnica de Resistência à Polarização Linear (LPR) em torno do valor do potencial de corrosão (E_{corr}).

Matematicamente, de acordo com Hiromoto (2019), ela é definida pela inclinação da porção linear da curva Potencial E versus Densidade de Corrente I no ponto do potencial de corrosão E_{corr} , conforme a Lei de Ohm:

$$R_p = \frac{\eta}{I} \quad (Eq. 7)$$

Ademais, o valor da resistência pode ser utilizado na análise da taxa de corrosão do material através do método de Stern e Geary:

$$\frac{\Delta E}{\Delta i} = R_p = \frac{\beta a \beta c}{2.3(i_{cor})(\beta a + \beta c)} \quad (Eq. 8)$$

Tabela 2: Valores de resistência à polarização (R_p) obtidos nos ensaios de polarização linear aos 5 minutos, 1 hora, 2 horas e 3 horas.

AISI 1035	Resistência ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Taxa (mm/ano)	AISI 1032	Resistência ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Taxa (mm/ano)
	média	média		média	média
5 min	90,67 ± 15,16	3,44 ± 0,51	5 min	88,94 ± 5,80	3,42 ± 0,23
1h	97,56 ± 19,90	3,24 ± 0,57	1h	108,60 ± 7,15	2,80 ± 0,19
2h	111,47 ± 27,80	2,91 ± 0,62	2h	133,96 ± 44,61	2,51 ± 0,67
3h	134,84 ± 34,36	2,50 ± 0,76	3h	165,69 ± 86,56	2,34 ± 0,88

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O conjunto de dados tabulados sobre a Resistência à Polarização (R_p) e a Taxa de Corrosão ao longo do tempo permite a validação quantitativa da observação feita no gráfico de Polarização Linear (LPR) e a consolidação da conclusão sobre a cinética de corrosão dos aços. A primeira e mais importante tendência é que, para ambos os aços, a Resistência (R_p) aumenta progressivamente ao longo das 3 horas de imersão, simultaneamente à queda das Taxas de Corrosão (de $\cong 3.4$ mm/year para $\cong 2.3$ - 2.5 mm/year).

Este comportamento demonstra o efeito protetor do possível filme de corrosão de FeCO_3 que se desenvolve na superfície, inibindo o ataque do meio saturado com CO_2 . Em temperaturas intermediárias (entre 40° e 60°C), tende a formar-se na superfície do aço um produto de corrosão compacto e protetor contendo Fe_3C e FeCO_3 (Cabrini et al., 2014). Além disso, a formação e a eficácia desse filme protetor são influenciadas pelo pH do meio. Valores de pH maiores que 6,6 resultam em precipitação mais rápida e na formação de filmes mais protetores, proporcionando um decréscimo da taxa de corrosão ao longo do tempo (Nesic, 2007).

Mais especificamente, os dados quantitativos confirmam a interpretação visual do gráfico LPR: a menor inclinação da curva do AISI 1032 (martensítico), que indicava maior R_p , se materializa nos valores de 3 horas, onde ele atinge a resistência máxima (165.69Ω) e, conseqüentemente, a taxa de Corrosão mais baixa (2.34 mm/ano). Em comparação, o AISI 1035 (perlítico) se estabiliza em 134.84Ω e 2.50 mm/ano. Portanto, embora o potencial de corrosão seja similar para ambos (conforme observado no OCP), o aço com a microestrutura martensítica demonstra, a longo prazo, uma capacidade ligeiramente superior de formar um filme de corrosão mais eficaz ou estável que o aço perlítico, resultando em uma melhor performance cinética no meio simulado de água do mar com CO_2 .

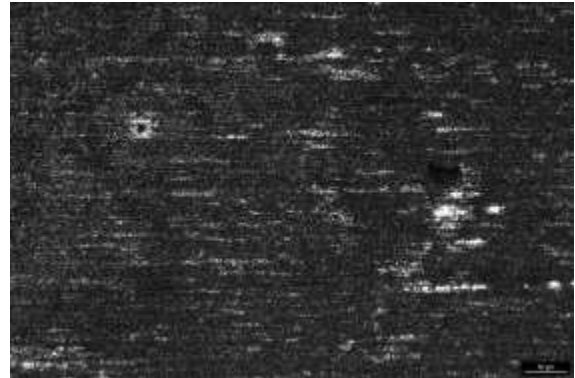
Figura 19: Superfície das amostras antes (1) e depois (2) da exposição ao teste LPR.

a) AISI 1032 — aumento de 200 vezes.

(1)



(2)



b) AISI 1035 — aumento de 200 vezes.

(1)



(2)



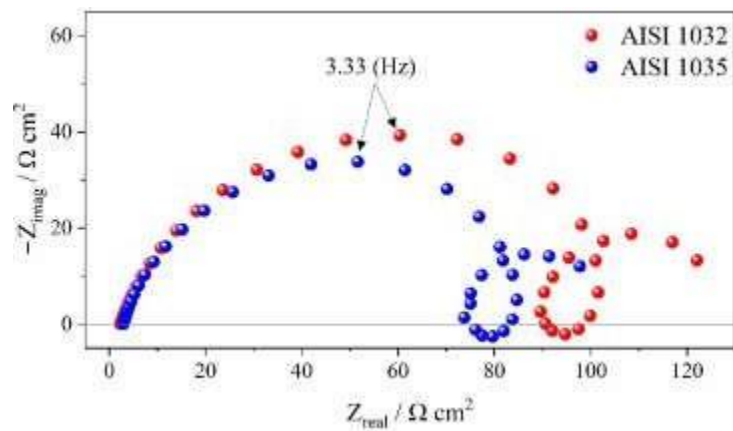
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após a exposição ao ensaio LPR, observa-se degradação generalizada da superfície dos aços, AISI 1032 e AISI 1035, como é representado na figura 19. A superfície previamente homogênea dá lugar a uma textura irregular, escurecida e com formação de produtos de corrosão distribuídos por toda a área analisada, evidenciando corrosão predominantemente uniforme ao longo de toda a peça.

5.3. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

A Figura 20 ilustra os espectros de impedância eletroquímica (EIE) obtidos para os dois aços analisados, com teores de carbono de 0,32% e 0,35%.

Figura 20: Diagrama de Nyquist para AISI 1032 e 1035.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O Diagrama de Nyquist (Figura 20), obtido pela EIE, relaciona a impedância real (Z_{real}) com a impedância imaginária (Z_{im}). O diâmetro do semicírculo de alta frequência é frequentemente associado à resistência de transferência de carga (R_p), sendo que um maior diâmetro ou maior impedância total indica maior resistência à corrosão. Embora o formato dos arcos apresentados para os aços AISI 1032 e AISI 1035 seja visualmente semelhante, a análise comparativa detalhada, cujos parâmetros estão consolidados na Tabela 3, confirmará se a pequena diferença de impedância total observada no gráfico é estatisticamente significativa ou não.

A Tabela 3 apresenta os valores de resistência à polarização (R_p) obtidos por meio dos ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). Como já citado anteriormente, a R_p é fundamental para caracterizar o comportamento eletroquímico dos aços, pois está inversamente relacionado à taxa de corrosão, conforme a relação de Stern-Geary.

Tabela 3: Valores de resistência à polarização (R_p) obtidos a partir dos ensaios de EIE.

AISI	R_p ($\Omega \text{ cm}^2$)
1032	$115,35 \pm 7,44$
1035	$105,26 \pm 6,77$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Os dados mostram que embora o valor pontual do R_p seja numericamente maior para o AISI 1032, a variação (cerca de 10Ω) é relativamente pequena quando comparada à dispersão dos dados, dada pelos desvios padrão. Assim, o ensaio de EIE revela que, na prática, a diferença na resistência à corrosão entre as microestruturas martensítica e perlítica, neste ambiente de

CO₂, não é estatística ou significativamente grande. O sistema corrosivo é, portanto, dominado por fatores ambientais e pela cinética de formação do filme, com as diferenças microestruturais resultando apenas em uma variação ligeira e pouco relevante nas taxas de corrosão para fins práticos.

6. CONCLUSÃO

Os aços AISI 1032 (martensítico) e AISI 1035 (perlítico) apresentaram comportamentos de corrosão muito semelhantes, mesmo possuindo microestruturas diferentes.

Os valores de Potencial de Circuito Aberto (E_{corr}) foram praticamente iguais para ambos, de aproximadamente $-0,68$ V, indicando que não houve diferença termodinâmica relevante de corrosão espontânea entre os materiais no ambiente simulado.

Nos ensaios cinéticos (EIE e LPR), o AISI 1032 apresentou valores de R_p ligeiramente maiores, porém a diferença foi pequena e não significativa, o que pode ser comprovado diretamente pelos valores numéricos das tabelas.

A conclusão geral é que a diferença das microestrutura, martensita e perlita, não desempenhou papel determinante no desempenho frente à corrosão nas condições avaliadas.

A similaridade dos resultados evidencia que a resistência à corrosão foi governada principalmente por fatores extrínsecos, como a interação dos materiais com o meio e a formação do filme de $FeCO_3$, que se desenvolveu de forma comparável em ambos os aços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, Zaki. **Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control**. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2006.
- BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea Engineering Handbook**. 2. ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2018.
- CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CARNEIRO, Lucas Rodrigo. **Análise numérica da curvatura dos arames da armadura de tração de dutos flexíveis durante processo de dobramento**. 2016. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/41868/41868.PDF>. Acesso em: 2 dez. 2025.
- CHANDRASEKARAN, Srinivasan. **Projeto de risers marinhos com materiais de gradiente funcional**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2021. (Um volume da série Woodhead Publishing em Engenharia Civil e Estrutural).
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 7, s. n., 2015.
- COMPRACO. **Curva C do Tratamento Térmico: Tudo o que você precisa saber**. Compraco Indústria e Construção, 3 maio 2024. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/industria/curva-c-do-tratamento-termico-tudo-o-que-voce-precisasaber?srltid=AfmBOop3rqEIs4qCUfKojz0UBoNRL3xseI5fRMMyMyQyaIWnB7hEStPS0>. Acesso em: 2 dez. 2025.
- Costa e Silva, André Luiz V. da; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Edgard Blücher. 2ª edição, 2006.
- ETT, Gerhard. **Noções básicas de corrosão**. 2016.
- FONTANA, Mars Guy. **Corrosion Engineering**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
- GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, v. 6. 2011.
- HIROMOTO, S. **Corrosion of metallic biomaterials**. In: Metals for Biomedical Devices. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 131–152.

LI, X.; JIANG, X.; HOPMAN, H. **A review on the prediction of critical collapse pressure of flexible risers for oil and gas production in ultra-deep waters.** *Ocean Engineering*, v. 231, 1 jul. 2021.

MENEZES, P. L.; SIDDAIAH, A.; RAMACHANDRAN, R. (ed.). **Tribocorrosion: Fundamentals, Methods, and Materials.** 1. ed. Cambridge, MA: Academic Press, 2021.

PONTES, Nivea. **Estudo da suscetibilidade à corrosão de aços carbono em meio de NaCl 3,5% utilizados como armaduras de tração em risers.** 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/83133/3/2025_tcc_nmrpontes.pdf. Acesso em: 2 dez. 2025.

PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E. **Phase Transformations in Metals and Alloys.** 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1992.

QUEIROZ, Carlos Henrique Barbosa. **Estudo da Influência do pH do Eletrólito no Comportamento Eletroquímico das Ligas UNS S41003 e Endur 300.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2021.

WIZMAC. **Corrosão Entendendo o QCM. 2015.** Disponível em: http://www.wizmac.com/2015/lecture/board01_view.htm?No=6&Sub_No=8. Acesso em: 2 dez. 2025.