



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA BACHARELADO

RAYSSA GABRIELLY FREITAS MONTEIRO

A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE COBRE NO PROCESSO
CORROSIVO DO AÇO DUPLEX 2205

FORTALEZA

2026

RAYSSA GABRIELLY FREITAS MONTEIRO

A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE COBRE NO PROCESSO
CORROSIVO DO AÇO DUPLEX 2205

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Química Bacharelado do Departamento de Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Química.

Orientador Pedagógico: Prof. L.D. Francisco Belmino Romero.

Orientador Profissional: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.

FORTALEZA

2026

RAYSSA GABRIELLY FREITAS MONTEIRO

A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE COBRE NO PROCESSO
CORROSIVO DO AÇO DUPLEX 2205

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Química do Centro de
Ciências da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Química.

Aprovada em: 19/01/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. L.D. Francisco Belmino Romero (Orientador Pedagógico)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Dr. Otílio Braulio Freire Diógenes (Examinador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

AGRADECIMENTOS

Meu primeiro agradecimento é a Deus, que me deu força e fé para trilhar essa caminhada e não ter me deixado desistir do meu futuro.

Aos meus pais por terem ajudado a proporcionar essa oportunidade de estudar e construir uma carreira da qual me orgulho.

Aos meus avós por serem um dos meus maiores amores, pelo apoio, incentivo e abraços dados ao longo desses anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Walney Silva Araújo pela ajuda e conselhos profissionais.

Ao Prof. Francisco Belmino Romero pela excelente orientação, pelos conselhos, incentivo, compreensão, força e carinho dado ao longo desse ano, um professor perfeito, me sinto honrada de ter sido sua aluna.

À Prof. Dra. Izaura Diógenes por ter sido minha orientadora durante boa parte da graduação, ter me feito uma profissional da qual posso me orgulhar e ter me proporcionados inúmeras oportunidades memoráveis, sinto muito carinho pela sua pessoa.

Ao Prof. Dr. Henrique Souza por ter sido minha inspiração e incentivo a nunca estar satisfeita com o conhecimento e sempre almejar mais, por ter me ensinado boa parte do que sei, por ter sido mais que um professor, um amigo.

À Prof. Dra. Maria das Graças, a eterna Gracinha, muito obrigada por ter sido uma ótima professora, seu ensino fez uma diferença gigante na mulher que eu sou dentro do universo profissional, me deu coragem e confiança.

Aos meus amigos de graduação obrigada pelas experiências e risadas ao longo de todo esse tempo.

À Alice Maria, minha melhor amiga, obrigada por estar sempre do meu lado durante todos esses anos, me deu força, me incentivou, não me deixou desistir, esteve do meu lado nos bons e nos maus momentos, quando estava entre a vida e a morte, obrigada.

À UFC, por ter me proporcionado os piores e melhores anos da minha vida até hoje.

À UFSCar, por ter fornecido as amostras para a realização desse trabalho.

Ao LPC, por ter me acolhido durante todo esse processo.

À CAPES, pelo apoio financeiro durante a graduação como um todo.

À FASTEF, por ter me aceitado como estagiária, podendo realizar esse trabalho incrível.

“Eu cheguei de muito longe
E a viagem foi tão longa
E na minha caminhada
Obstáculos na estrada
Mas enfim aqui estou.”

Erasmu Carlos.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da adição de diferentes teores de cobre no comportamento corrosivo do aço inoxidável duplex 2205, quando exposto a meios contendo cloreto de sódio sob diferentes condições de pH, uma vez que a literatura indica que o efeito do cobre sobre a resistência à corrosão desse material não apresenta um comportamento constante em função do seu teor. As amostras analisadas consistiram em aço duplex 2205 sem adição de cobre e com adições de 2% e 4% de Cu. A investigação foi conduzida em temperatura ambiente (25 °C) por meio de técnicas eletroquímicas, incluindo monitoramento do potencial de circuito aberto (OCP), polarização potenciodinâmica linear e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), além de análises por microscopia óptica para avaliação metalográfica da superfície após os ensaios. Os resultados indicaram que a redução do pH aumentou a agressividade do meio para todas as amostras, promovendo deslocamentos do potencial para valores mais negativos e intensificando a corrosão localizada. A adição de 2% de Cu mostrou-se benéfica, especialmente em meio mais ácido, apresentando maior estabilidade eletroquímica, valores mais nobres de potencial de corrosão e maiores módulos de impedância em baixas frequências, associados à maior estabilidade da película passiva. Em contrapartida, a amostra com 4% de Cu não apresentou melhoria proporcional no desempenho corrosivo, sugerindo que teores elevados desse elemento podem comprometer a estabilidade do material. De modo geral, o estudo apresentou caráter qualitativo e quantitativo, permitindo estabelecer relações entre o teor de cobre, a acidez do meio e o comportamento corrosivo do aço duplex 2205, fornecendo embasamento técnico para a seleção e aplicação desse material em ambientes industriais agressivos.

Palavras-chave: aço inoxidável duplex; corrosão; cobre; pH; técnicas eletroquímicas.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the influence of different copper contents on the corrosion behavior of duplex stainless steel 2205 when exposed to sodium chloride-containing media under different pH conditions, since the literature indicates that the effect of copper on the corrosion resistance of this material does not exhibit a consistent trend as a function of its content. The analyzed samples consisted of duplex stainless steel 2205 without copper addition and with 2 wt.% and 4 wt.% Cu additions. The investigation was carried out at room temperature (25 °C) using electrochemical techniques, including open circuit potential (OCP) monitoring, linear potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), as well as optical microscopy analyses for metallographic surface evaluation after the tests. The results indicated that decreasing pH increased the aggressiveness of the environment for all samples, promoting shifts in the potential toward more negative values and intensifying localized corrosion. The addition of 2 wt.% Cu proved to be beneficial, especially under more acidic conditions, showing higher electrochemical stability, more noble corrosion potential values, and higher impedance modulus at low frequencies, which are associated with increased stability of the passive film. In contrast, the sample containing 4 wt.% Cu did not show a proportional improvement in corrosion performance, suggesting that higher copper contents may compromise material stability. Overall, the study exhibited a qualitative and quantitative approach, allowing the establishment of relationships between copper content, medium acidity, and the corrosion behavior of duplex stainless steel 2205, providing technical support for the selection and application of this material in aggressive industrial environments.

Keywords: duplex stainless steel; corrosion; copper; pH; electrochemical techniques.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microestrutura típica de um aço inoxidável A) austenítico, B) ferrítico, C) duplex e D) martensítico.....	20
Figura 2 – Representação esquemática da corrosão por pite	23
Figura 3 – Diagrama simplificado de potencial e pH para o sistema Fe-H ₂ O.....	25
Figura 4 – Representação esquemática das principais regiões de uma curva de polarização.....	27
Figura 5 – Esquema de obtenção do aço duplex 2205.	30
Figura 6 – Representação esquemática da metodologia de realização do seguinte trabalho.	31
Figura 7 – Figura esquemática da célula eletroquímica utilizada ao longo da realização do trabalho.	32
Figura 8 – Gráfico de OCP para as amostras com diferentes adições de Cu A) pH neutro; B) pH 4,0 e C) pH 2,0	35
Figura 9 – Curvas de polarização potenciodinâmica linear para as amostras com diferentes adições de Cu A) pH neutro; B) pH 4,0 e C) pH 2,0.	37
Figura 10 – Micrografias ópticas da amostra sem adição de cobre A) pH neutro pré-polarização, B) pH neutro pós-polarização, C) pH 4,0 pré-polarização, D) pH 4,0 pós-polarização, E) pH 2,0 pré-polarização e F) pH 2,0 pós-polarização.	40
Figura 11 – Micrografias ópticas da amostra com 2% de Cu na lente 5x, 500 µm A) pH neutro pré-polarização, B) pH neutro pós-polarização, C) pH 4,0 pré-polarização, D) pH 4,0 pós-polarização, E) pH 2,0 pré-polarização e F) pH 2,0 pós-polarização.....	41

Figura 12 – Micrografias ópticas da amostra com 4% de Cu na lente 5x, 500 μm A) pH neutro pré-polarização, B) pH neutro pós-polarização, C) pH 4,0 pré-polarização, D) pH 4,0 pós-polarização, E) pH 2,0 pré-polarização e F) pH 2,0 pós-polarização..... 42

Figura 13 – Diagramas de Bode para as amostras com diferentes adições de cobre A) Bode módulo pH neutro, B) Bode fase pH, neutro, C) Bode módulo pH 4,0, D) Bode fase pH 4,0, E) Bode módulo pH 2,0 e F) Bode fase pH 2,0. 43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço experimental 2205 em % em massa, sendo o Ferro o elemento de balanço.....	31
Tabela 2 – Soluções eletrolíticas utilizadas ao longo do trabalho.	32
Tabela 3 – Média dos valores de OCP das amostras de aço duplex 2205 com diferentes adições de Cu em meio de NaCl 2 mol L ⁻¹ em diferentes valores de pH.	34
Tabela 4 – Média dos valores de E_{corr} das amostras de aço duplex 2205 com diferentes adições de Cu em meio de NaCl 2 mol L ⁻¹ em diferentes valores de pH, obtidos através das curvas de polarização.	38
Tabela 5 – Média dos valores de módulo de impedância ($ Z $) das amostras de aço duplex 2205 com diferentes adições de Cu em meio de NaCl 2 mol L ⁻¹ em diferentes valores de pH, obtidos através dos gráficos de Bode	45

LISTA DE ABREVIACOES

DEMa - Departamento de Engenharia de Materiais

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

LPC - Laboratório de Pesquisa em Corrosão

UFC - Universidade Federal do Ceará

OCP - Monitoramento de Potencial de Circuito Aberto

EIE - Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Sat. - Saturado

MO - Microscopia ptica

LISTA DE SÍMBOLOS

pH - Potencial de Hidrogênio
NaCl - Cloreto de Sódio
Fe - Elemento Ferro
Cu – Elemento Cobre
Cr - Elemento Cromo
Mo - Elemento Molibdênio
Si - Elemento Silício
Ni - Elemento Níquel
C - Elemento Carbono
Mn - Elemento Manganês
P - Elemento Fósforo
S - Elemento Enxofre
N - Elemento Nitrogênio
Ag - Elemento Prata
% - Percentagem
HCl - Ácido Clorídrico
°C - Graus Celsius
H₂O - Água
H⁺ - Íons Hidrogênio
Fe³⁺ - Íon ferro III
Fe²⁺ Íon ferro II
Fe(OH)₃ - Hidróxido férrico
Fe(OH)₂ - Hidróxido ferroso
Fe₂O₃ - Óxido férrico
Fe₃O₄ - Tetróxido de triferro
HFeO₂⁻ - Hidróxido-Óxido ferrato(II)
L - Litro
E_p Potencial de Passivação
E_{pit} Potencial de Pite
E_{corr} - Potencial de Corrosão
E - Potencial
V - Volt

A - Ampere

$|Z|$ - módulo de impedância

Hz - Hertz

AgCl - Cloreto de Prata

KCl - Cloreto de Potássio

s - Segundos

h - Hora

min - Minuto

R_p - Resistencia à Polarização

i - Densidade de Corrente

mm - Milímetro

cm - Centímetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Corrosão	19
2.2 Aço inoxidável.	19
2.3 Aço duplex	21
2.4 Corrosão em aço duplex	22
2.5 Elementos de liga	23
2.6 Influência do pH em aços inoxidáveis	24
2.7 Ensaios eletroquímicos.	26
3 OBJETIVOS.....	29
3.1 Objetivo geral.....	29
3.2 Objetivos específicos.....	29
4 MATERIAIS	30
5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	31
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
6.1 Monitoramento de Potencial de Circuito Aberto	34
6.2 Polarização Pontocinética Linear.	36
6.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica.....	43
7 CONCLUSÃO.....	46
8 PERSPECTIVAS FUTURAS	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Em torno de 1200 a.C., teve início a chamada Idade do Ferro, período marcado pelo surgimento dos primeiros utensílios e estruturas construídas com ferro como matéria-prima. O domínio progressivo das técnicas de extração e processamento desse material proporcionou avanços significativos em áreas como agricultura, conquista territorial e comércio, promovendo profundas transformações sociais e econômicas em diversas regiões do mundo (*História Do Aço - Instituto Aço Brasil*. n.d.).

Com o avanço do conhecimento metalúrgico, o ferro deixou de ser utilizado apenas em sua forma mais simples, passando a ser progressivamente modificado por meio da adição de outros elementos. Essa melhoria possibilitou o desenvolvimento de ligas metálicas com propriedades superiores, especialmente no que se refere à resistência mecânica, ductilidade e capacidade de conformação. Nesse contexto, o aço consolidou-se como um material de grande relevância para a engenharia e para o desenvolvimento industrial, tornando-se essencial em setores como construção civil, transporte e manufatura (*Teixeira et al. 2017*).

Apesar das melhorias obtidas com o desenvolvimento do aço, a durabilidade desses materiais ainda era fortemente comprometida pela corrosão, especialmente em ambientes agressivos. A degradação superficial causada por processos oxidativos não apenas reduz a vida útil das estruturas metálicas, como também acarreta elevados custos de manutenção e substituição. Diante desse desafio, intensificaram-se as pesquisas voltadas ao desenvolvimento de ligas capazes de aliar boas propriedades mecânicas à elevada resistência à corrosão, culminando no surgimento do aço inoxidável (*Teixeira et al. 2017*).

Uma das principais características dos aços inoxidáveis é o teor de cromo superior ao das demais classes de aços, uma vez que esse elemento é o principal responsável pela formação de uma camada passiva na superfície do material, atribuindo maior resistência à corrosão. O aumento da concentração de cromo, aliado à adição de outros elementos de liga, possibilitou o desenvolvimento de materiais com maior estabilidade em meios agressivos. A partir da evolução da metalurgia, surgiram classes mais avançadas de aços inoxidáveis, destacando-se os aços inoxidáveis duplex, que combinam os efeitos benéficos da elevada concentração de cromo com uma microestrutura bifásica, com o objetivo de obter materiais com melhores propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão (*The Atlas Steels Technical Handbook of Stainless Steels, 2013; Chiaverini, 1988*).

Entre os elementos de liga empregados nos aços inoxidáveis duplex, o cobre destaca-se por sua influência no comportamento eletroquímico do material, especialmente em meios corrosivos. A adição de elementos de liga tem como finalidade modificar propriedades

específicas dos aços, como a resistência à corrosão e a estabilidade em determinados ambientes químicos. Assim, o cobre tem sido utilizado em ligas visando, por exemplo, à melhoria da resistência à corrosão em meios ácidos. Ambientes contendo íons cloreto e soluções ácidas representam condições particularmente agressivas para materiais metálicos, tornando relevante a avaliação do comportamento do aço inoxidável duplex sem adição de cobre e com diferentes teores desse elemento em meio contendo cloreto de sódio e ácido clorídrico, de modo a contribuir para a compreensão da atuação do cobre como elemento de liga em condições agressivas (*Chiaverini, 1988; Silva & Mei, 2010*).

Nesse contexto, o presente estudo se enquadra como uma contribuição para a compreensão do comportamento corrosivo do aço inoxidável duplex 2205 em ambientes agressivos, com ênfase na influência do pH e da adição de cobre como elemento de liga. A utilização de técnicas eletroquímicas aliadas à análise morfológica da superfície permitiu avaliar de forma integrada os efeitos da acidez do meio e da composição química na estabilidade da película passiva e nos mecanismos de corrosão, aspectos amplamente discutidos na literatura como determinantes para o desempenho de aços inoxidáveis (*Gentil, 2011; Fontana, 1986*). Ao evidenciar que a adição controlada de cobre pode promover maior estabilidade eletroquímica em meios ácidos, enquanto teores elevados podem comprometer esse desempenho, o trabalho fornece fundamentos técnicos relevantes para a seleção e otimização de aços duplex destinados a aplicações industriais sujeitas a condições severas, contribuindo para a redução dos efeitos da corrosão e para o aumento da durabilidade desses materiais (*Chiaverini, 1988; Silva & Mei, 2010*).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Corrosão

De acordo com *Jones (1996)*, corrosão é o ataque destrutivo de um metal ou liga metálica resultante de sua reação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra inserido. Esse fenômeno está associado à tendência natural dos metais de retornarem a estados termodinamicamente mais estáveis, geralmente na forma de compostos químicos semelhantes aos minérios dos quais foram originalmente extraídos.

A ocorrência da corrosão, em especial a atmosférica, está relacionada à presença de um meio eletrolítico, como soluções aquosas ou camadas finas de umidade condensada sobre a superfície metálica, que possibilitam o desenvolvimento das reações eletroquímicas responsáveis pela deterioração do material. Embora os mecanismos envolvidos possam variar conforme o tipo de metal, a composição da liga e as condições do ambiente, os princípios fundamentais do processo corrosivo são os mesmos (*Wolyneec, 2003*).

As reações corrosivas resultam em consequências significativas para os materiais metálicos, incluindo a perda de massa, a degradação das propriedades mecânicas e o comprometimento da integridade estrutural (*Gentil, 2011*). Dessa forma, a corrosão assume grande relevância técnica e econômica, tornando essencial o seu estudo para a adequada seleção de materiais e para o desenvolvimento de ligas mais resistentes, especialmente quando destinadas à aplicação em ambientes agressivos.

2.2 Aço inoxidável

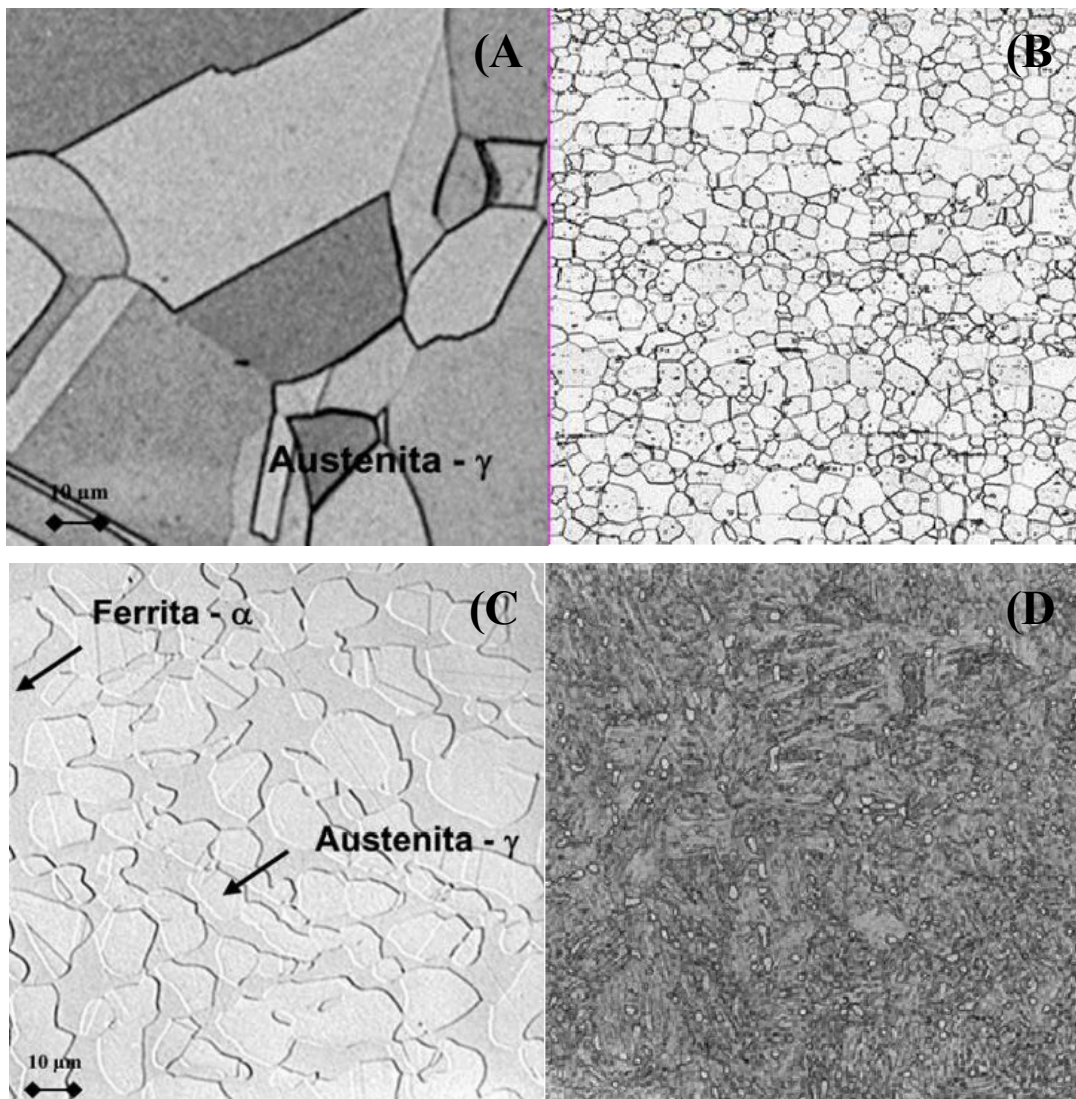
Os aços inoxidáveis constituem uma classe de aços ligados caracterizada, principalmente, pela presença de um teor mínimo de cromo em sua composição química, geralmente igual ou superior a 10,5%. A adição desse elemento confere ao material elevada resistência à corrosão, devido à formação espontânea de uma película passiva rica em óxido de cromo na superfície do metal, a qual atua como barreira protetora contra o meio agressivo (*Chiaverini, 1988; Gentil, 2011*).

Além do cromo, outros elementos de liga, como níquel, molibdênio, manganês, nitrogênio e cobre, podem ser adicionados aos aços inoxidáveis com o objetivo de modificar propriedades específicas, como resistência mecânica, tenacidade, soldabilidade e comportamento frente à corrosão em diferentes ambientes. A combinação e os teores desses elementos influenciam diretamente a microestrutura do material, assim sua resistência à corrosão em ambientes agressivos contendo, por exemplo, soluções ácidas e íons cloreto (*Sedriks, 1996*).

Aços inoxidáveis são amplamente utilizados em diferentes setores industriais, como os segmentos químico, petroquímico, alimentício, médico-hospitalar, metalúrgico, dentre outros. Portanto, a compreensão do comportamento desses materiais é de suma importância socioeconômica, uma vez que possibilita sua uma melhor utilização e boa seleção de acordo com suas diferentes propriedades e capacidades.

De acordo com *Davis (1994)*, os aços inoxidáveis podem ser diferenciados com base em sua estrutura cristalina e nos mecanismos de endurecimento, classificados em aços inoxidáveis ferríticos, martensíticos, austeníticos, duplex, dentre outros. Cada uma dessas classes apresenta características específicas de microestrutura e propriedades, o que permite a seleção do material mais adequado conforme as exigências do meio o qual o metal será empregado. A Figura 1 apresenta um exemplo da microestrutura típica dos aços inoxidáveis.

Figura 1 – Microestrutura típica de um aço inoxidável A) austenítico, B) ferrítico, C) duplex e D) martensítico.



Os aços inoxidáveis podem ser classificados de acordo com sua microestrutura, a qual é determinada pela composição química e influencia diretamente as propriedades mecânicas e o comportamento à corrosão. Os aços ferríticos apresentam estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), com boa resistência à corrosão em meios moderados e menor ductilidade. Os aços austeníticos possuem estrutura cúbica de face centrada (CFC), destacando-se pela elevada ductilidade, boa soldabilidade e ampla aplicação industrial. Os aços martensíticos apresentam alta resistência mecânica e dureza, porém menor resistência à corrosão. Já os aços inoxidáveis duplex possuem microestrutura bifásica de ferrita e austenita, combinando elevada resistência mecânica e excelente resistência à corrosão, sendo indicados para ambientes agressivos (*Chiaverini, 1988; Davis, 1994; Sedriks, 1996; Gunn, 1997; Gentil, 2011*).

2.3 Aço duplex

Os aços inoxidáveis duplex constituem uma classe de materiais metálicos caracterizada por uma microestrutura bifásica, composta por frações aproximadamente equivalentes de ferrita e austenita, mostrado anteriormente na figura 1-C. Essa configuração microestrutural confere aos aços duplex um conjunto equilibrado de propriedades, combinando elevada resistência mecânica com boa resistência à corrosão, especialmente quando comparados aos aços inoxidáveis monofásicos tradicionais (*Gunn, 1997; Davis, 1994*).

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis duplex está associada não apenas à presença de elevados teores de cromo, mas, principalmente, ao equilíbrio entre sua microestrutura bifásica e a adição de elementos estabilizadores de austenita, como níquel, carbono e nitrogênio, e estabilizadores da ferrita, como cromo, molibdênio e silício (*Senatore et al. 2007*). Esses fatores são os principais responsáveis por aumentar a resistência à corrosão do material em ambientes agressivos, visto que a presença das fases ferrítica e austenítica contribui para a redução de processos corrosivos quando comparada aos aços inoxidáveis monofásicos (*Gunn, 1997; Davis, 1994*).

Com o avanço do desenvolvimento metalúrgico, surgiram diferentes gerações de aços inoxidáveis duplex, caracterizadas por um controle mais rigoroso da composição química e pela otimização da adição de elementos de liga. Esses avanços resultaram em melhorias significativas na estabilidade microestrutural, na soldabilidade e no desempenho em ambientes de elevado potencial corrosivo, como águas salobras, água do mar e meios industriais severos (*Gunn, 1997; Silva & Mei, 2010*). Segundo *Chiaverini (1988)*, tais características consolidaram os aços inoxidáveis duplex como materiais estratégicos, uma vez que combinam elevada

resistência mecânica com excelente resistência à corrosão, ampliando significativamente seu campo de aplicação em condições de serviço agressivas.

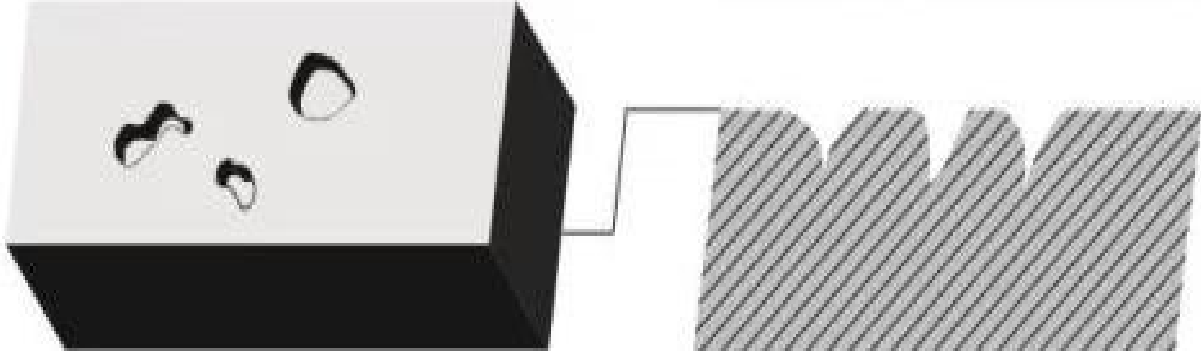
2.4 Corrosão em aço duplex

Os aços inoxidáveis duplex apresentam diferente comportamento corrosivo devido a microestrutura bifásica. Essa característica confere ao material um equilíbrio favorável entre elevada resistência mecânica e boa resistência à corrosão quando comparado aos aços inoxidáveis monofásicos convencionais, como os ferríticos e os austeníticos (*Davis, 1994; Gunn, 1997*).

A elevada resistência à corrosão dos aços duplex está fortemente associada aos altos teores de cromo presente na composição do material, responsável pela formação espontânea de uma película passiva rica em óxidos de cromo na superfície do material. Essa película atua como barreira protetora, reduzindo a taxa de dissolução metálica por meio da limitação da reação anódica de oxidação do ferro, representada de forma simplificada pela reação: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$. A estabilidade dessa camada passiva é fundamental para o bom desempenho dos aços inoxidáveis em ambientes agressivos e depende tanto da composição da liga quanto das condições eletroquímicas do meio (*Marcus, 2011; Roberge, 2019*).

Em ambientes mais agressivos, entretanto, essa camada passiva pode sofrer ruptura localizada, dando origem à corrosão por pites (*Chen et al, 2020*), como mostrado na figura 2, um dos principais mecanismos de degradação associados aos aços inoxidáveis duplex. A corrosão por pites inicia-se, geralmente, em regiões onde a película passiva apresenta defeitos ou heterogeneidades microestruturais. Os íons presentes em solução, como Cl^- , adsorvem-se na superfície do óxido passivo, promovendo sua desestabilização local e favorecendo a dissolução anódica do metal no interior do pite. No interior dessas cavidades, ocorre o acúmulo de espécies metálicas e a hidrólise dos íons Fe^{2+} , conforme a reação: $Fe^{2+} + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2H^+$, o que leva à acidificação local do meio e acelera ainda mais o processo corrosivo (*Sedriks, 2013; Roberge, 2019*).

Figura 2 – Representação esquemática da corrosão por pite.



Fonte: Adaptado de Alves, J. 2019.

Enquanto o interior do pite atua como região anódica, a superfície externa permanece relativamente passiva e funciona como cátodo, onde ocorre, predominantemente, a reação de redução do oxigênio dissolvido: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. Essa separação espacial entre regiões anódicas e catódicas intensifica a corrosão localizada, tornando o ataque por pites particularmente perigoso, uma vez que pode ocorrer com pouca perda de massa global, mas com severo comprometimento da integridade estrutural do material (Fontana, 1986; Jones, 1996).

Nessas condições, fatores como pH do meio, composição química da liga, estado superficial e adição de elementos de liga influenciam diretamente a estabilidade da película passiva e a cinética das reações eletroquímicas envolvidas (Jones, 1996; Silva & Mei, 2010). Dessa forma, o estudo da corrosão em aços inoxidáveis duplex torna-se essencial para a compreensão dos mecanismos eletroquímicos responsáveis pela degradação do material, permitindo avaliar seus limites de desempenho e orientar a aplicação dessas ligas em ambientes de serviço severos.

2.5 Elementos de liga

Elementos de liga tem um importante papel sobre a estabilização das diferentes fases presentes no aço duplex, ferrita e austenita, assim como também podem alterar características intrínsecas do próprio metal. Dentre as vantagens existentes no uso desses elementos de liga pode-se destacar o aumento da resistência à corrosão associada ao cromo, molibdênio, nitrogênio, níquel e cobre, como citado anteriormente (Chiaverini, 1988; Chen et al. 2012).

O cobre como elemento de liga vem sendo associado por diversos pesquisadores como um elemento químico que favorece a resistência à corrosão do aço duplex em ambientes ácidos (Chiaverini, 1988). Porém, há controvérsias sobre o papel desempenhado pelo cobre, já vem

sendo retratado na literatura que o cobre pode causar um efeito desestabilizador da camada passiva, o que diminui a resistência a corrosão e a maior propensão a corrosão por pite (*Jeon et al. 2014*). De acordo com *Lizlovs (1966)*, a adição de cobre em aço com até 1% de molibdênio a adição de cobre causou instabilidade de película passiva, enquanto em aços contendo 3% de molibdênio a adição de cobre foi benéfica.

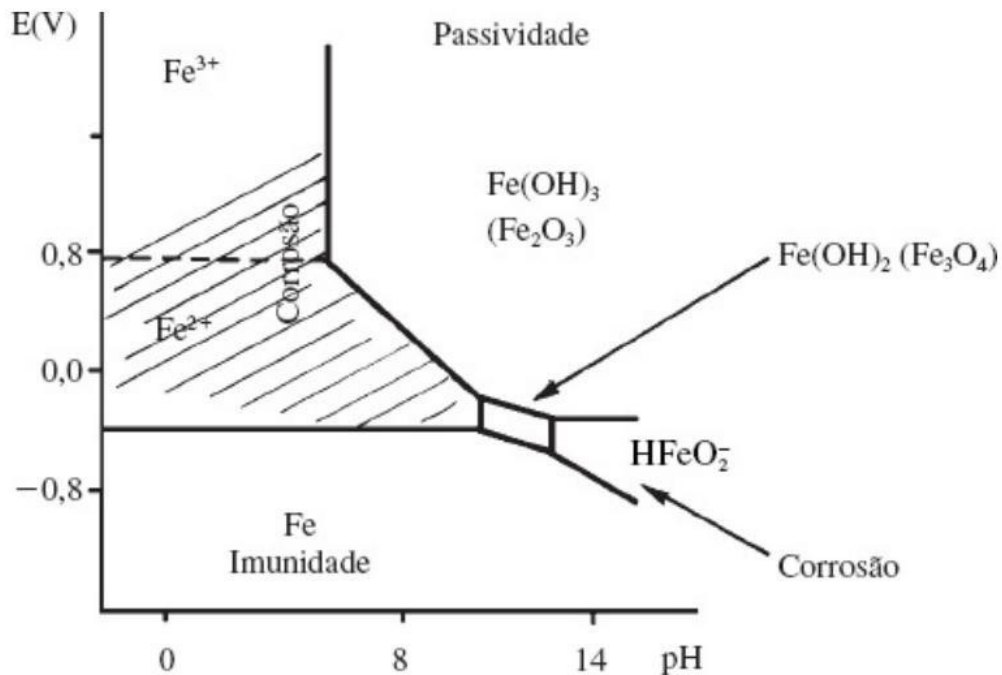
Dessa forma, embora o cobre seja frequentemente apontado como um elemento potencialmente benéfico para o desempenho à corrosão dos aços inoxidáveis duplex, seu efeito não é necessariamente constante e pode variar conforme o teor adicionado e o ambiente de exposição. Essa divergência de informações reforça a importância de estudos direcionados à avaliação do comportamento eletroquímico de aços duplex contendo diferentes teores de cobre em meios agressivos, contribuindo para uma melhor compreensão do papel desse elemento de liga.

2.6 Efeito do pH na corrosão de aços inoxidáveis

O pH do meio corrosivo influencia não apenas a taxa global de corrosão, mas também os mecanismos eletroquímicos dominantes e a estabilidade da película passiva formada na superfície dos aços inoxidáveis. Conforme apresentado por *Jones (1996)*, a variação do pH altera o equilíbrio entre as reações anódicas de dissolução metálica e as reações catódicas, modificando o potencial de corrosão e a tendência à passivação ou ativação do material. Em meios ácidos, a elevada concentração de íons H^+ favorece a reação catódica, aumentando a cinética do processo corrosivo.

O diagrama potencial-pH (diagramas de Pourbaix) do sistema Fe-H₂O, apresentado na Figura 3, evidencia a influência conjunta do pH e do potencial eletroquímico na estabilidade de materiais ferrosos em meio aquoso. Observa-se a existência de três regiões distintas: imunidade, corrosão ativa e passividade, associadas, respectivamente, à estabilidade do metal, à formação de espécies solúveis e à presença de óxidos e hidróxidos protetores. A redução do pH favorece a estabilidade de espécies iônicas de ferro, ampliando a região de corrosão ativa, enquanto valores mais elevados de pH e potenciais mais nobres favorecem a formação de camadas passivas. Dessa forma, os diagramas de Pourbaix constituem uma ferramenta fundamental para compreender, sob o ponto de vista termodinâmico, como variações de acidez do meio podem influenciar o comportamento corrosivo de aços inoxidáveis, conforme discutido por *Gentil (2011)*.

Figura 3 - Diagrama simplificado de potencial e pH para o sistema Fe-H₂O.



Fonte: Gentil, 2011.

De acordo com *Gentil (2011)*, para materiais capazes de se passivar, como os aços inoxidáveis, a redução do pH tende a diminuir a estabilidade dos óxidos protetores, em especial daqueles ricos em cromo, deslocando o sistema para condições nas quais a dissolução metálica se torna termodinamicamente mais favorável. Em soluções fortemente ácidas, essa condição pode levar à dissolução contínua da camada passiva, dificultando os processos de repassivação e tornando o material mais suscetível à corrosão, conforme discutido também por *Jones (1996)*.

Nos aços inoxidáveis duplex, a influência do pH é agravada pela coexistência das fases ferrítica e austenítica, que apresentam diferentes comportamentos eletroquímicos. *Gunn (1997)* aponta que, em meios ácidos, essas diferenças podem levar à dissolução preferencial de uma das fases, especialmente da ferrita, que tende a ser menos nobre em determinados ambientes. Esse fenômeno pode resultar em corrosão seletiva, comprometendo a integridade microestrutural do material, mesmo quando a corrosão generalizada é limitada.

Além disso, o pH atua de forma sinérgica com íons cloreto, amplificando a agressividade do meio. *Sedriks (1996)* destaca que, em baixos valores de pH, os íons cloreto tornam-se mais eficazes na penetração e ruptura da camada passiva, favorecendo o início da corrosão localizada, facilitada pela redução da capacidade de repassivação devido a acidificação do meio.

Do ponto de vista cinético, *Fontana (1986)* ressalta que a redução do pH não apenas aumenta a taxa de corrosão, mas também altera os mecanismos de controle do processo, podendo deslocar o sistema de um regime controlado por transferência de carga para um regime controlado por difusão. Em ambientes industriais onde ocorrem variações de pH, como em processos químicos ou sistemas de dessalinização, esse comportamento torna-se crítico para a seleção e o desempenho dos aços inoxidáveis duplex.

Dessa forma, a avaliação do efeito do pH sobre a corrosão dos aços inoxidáveis duplex é essencial para compreender sua resposta eletroquímica em ambientes agressivos, especialmente aqueles contendo soluções ácidas associadas a íons cloreto. A análise desse parâmetro contribui para a interpretação dos resultados eletroquímicos e para a correta aplicação desses materiais em condições operacionais severas.

2.7 Ensaios eletroquímicos

2.7.1 Monitoramento de potencial de circuito aberto (OCP)

O potencial de circuito aberto (Open Circuit Potential – OCP) corresponde ao potencial eletroquímico estabelecido espontaneamente na interface entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência, na ausência de corrente externa aplicada. Esse potencial resulta do equilíbrio dinâmico entre as reações anódicas e catódicas que ocorrem simultaneamente na superfície do material (*Wolyneec, 2003*).

Em aços inoxidáveis, o acompanhamento do OCP ao longo do tempo fornece informações importantes sobre a formação e a estabilidade da camada passiva. Deslocamentos do potencial para valores mais positivos (nobres) estão geralmente associados à passivação ou repassivação da superfície, enquanto deslocamentos para valores mais negativos indicam maior tendência à ativação e à corrosão, especialmente em meios ácidos (*Gentil, 2011*).

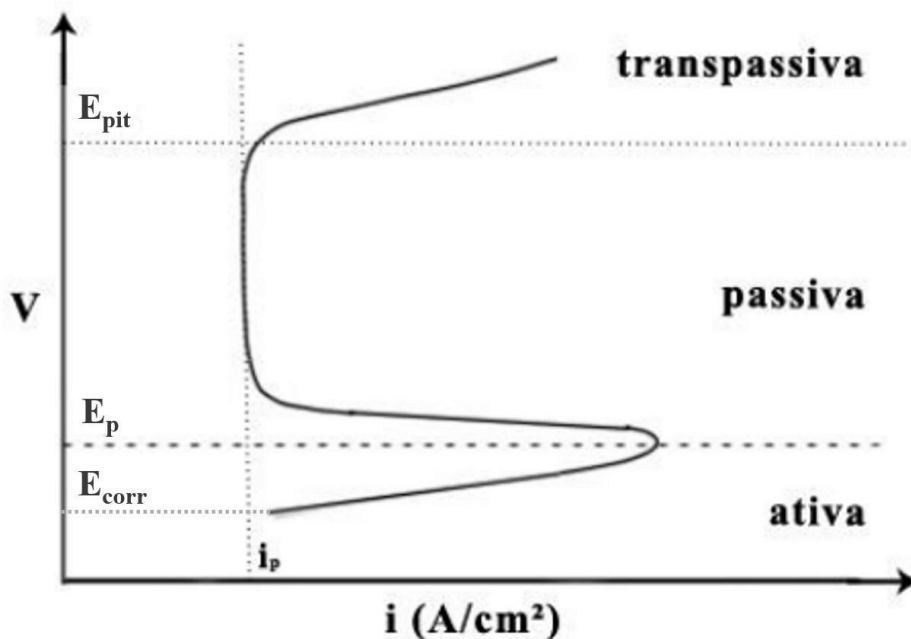
2.7.2 Polarização Potenciodinâmica Linear

A técnica de polarização potenciodinâmica consiste na varredura controlada do potencial do eletrodo de trabalho em função do tempo, permitindo a obtenção de curvas de densidade de corrente em função do potencial. Por meio dessas curvas, é possível avaliar parâmetros importantes como o potencial de corrosão, a densidade de corrente de corrosão, a região de passivação e a suscetibilidade à corrosão localizada (*Fontana, 1986*).

O gráfico de polarização potenciodinâmica apresenta diferentes regiões associadas aos mecanismos eletroquímicos que ocorrem na superfície do material. Inicialmente, observa-se a

região ativa, caracterizada pela dissolução metálica. Em materiais passiváveis, como os aços inoxidáveis, essa região é seguida pela formação de uma camada passiva, evidenciada pela redução da densidade de corrente. Em potenciais mais elevados, pode ocorrer a ruptura dessa película, resultando no aumento da corrente e indicando a suscetibilidade à corrosão localizada. A análise dessas regiões permite avaliar a estabilidade da camada passiva e o comportamento corrosivo do material (*Gentil, 2011; Sedriks, 1996*). Essas regiões estão representadas na figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática das principais regiões de uma curva de polarização.



Fonte: Adaptado de Jones, 1996.

Um parâmetro importante que pode ser retirado de uma curva de polarização é o potencial de corrosão (E_{corr}), corresponde ao potencial no qual as correntes anódica e catódica se igualam, caracterizando o equilíbrio eletroquímico do sistema. Esse parâmetro é obtido diretamente da curva de polarização e fornece uma indicação termodinâmica da tendência do material à corrosão, sendo que valores mais nobres de E_{corr} estão associados a maior estabilidade eletroquímica do material (*Jones, 1996*).

Dessa forma, a técnica de polarização potenciodinâmica constitui uma ferramenta fundamental para a caracterização do comportamento eletroquímico dos materiais metálicos, permitindo a obtenção de parâmetros quantitativos relacionados a resistência à corrosão do material e à estabilidade da camada passiva. A análise conjunta do potencial de corrosão e das regiões características da curva de polarização possibilita uma avaliação consistente dos

mecanismos eletroquímicos atuantes na superfície do material, especialmente em aços inoxidáveis duplex expostos a meios agressivos, objeto de estudo desse trabalho.

2.7.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) consiste na aplicação de um sinal alternado de pequena amplitude ao sistema eletroquímico, em uma ampla faixa de frequências, permitindo a investigação dos diferentes processos eletroquímicos que ocorrem na interface metal/eletrólito (*Roberge, 2019*).

A interpretação dos resultados de EIE pode ser realizada por meio dos diagramas de Bode, nos quais são analisados o módulo da impedância ($|Z|$) e o ângulo de fase em função da frequência. O módulo de impedância em baixas frequências está diretamente associado à resistência global do sistema aos processos eletroquímicos, sendo frequentemente utilizado como um parâmetro qualitativo para avaliar a resistência à corrosão do material. Valores mais elevados de $|Z|$ nessa região indicam maior oposição à transferência de carga e, conseqüentemente, um comportamento eletroquímico mais estável (*Gentil, 2011; Roberge, 2019*).

Para os aços inoxidáveis duplex, a análise do módulo de impedância ao longo do tempo é particularmente útil na avaliação da estabilidade da película passiva e na identificação de alterações induzidas por variações de pH. Reduções nos valores de $|Z|$ em baixas frequências podem indicar degradação da camada passiva, início de processos de corrosão localizada ou dificuldades na repassivação da superfície metálica (*Sedriks, 1996*).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos Gerais

O objetivo desse trabalho é analisar a influência da adição de diferentes teores de cobre, como elemento de liga, na composição do aço inoxidável duplex, quando exposto a meio salino com diferentes valores de pH.

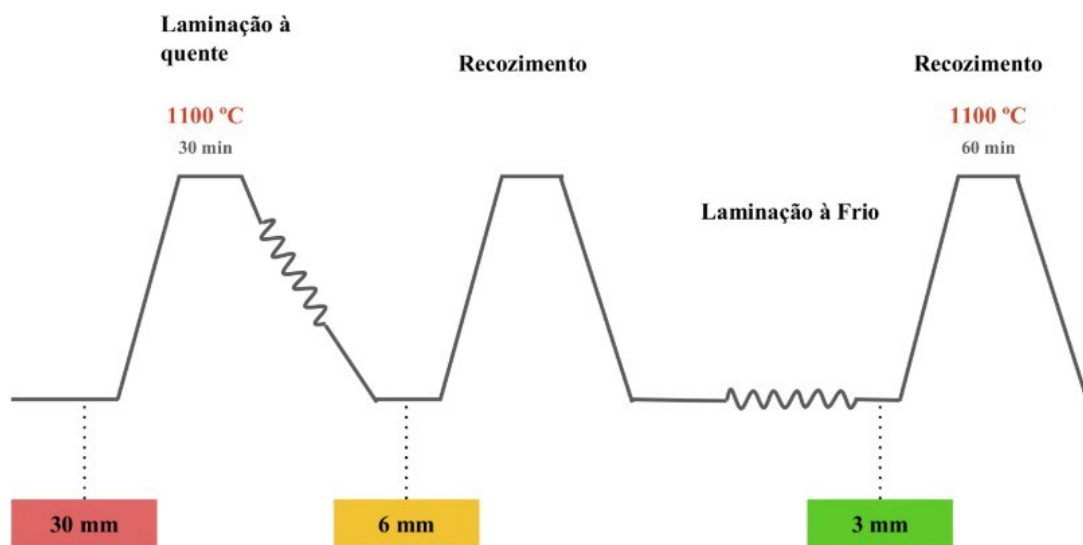
3.2 Objetivos específicos

- Avaliar a resistência à corrosão do aço inoxidável duplex por meio de técnicas eletroquímicas, monitoramento do potencial de circuito aberto, espectroscopia de impedância eletroquímica e polarização potenciodinâmica linear;
- Avaliar o comportamento do material estudado por meio de microscopia óptica (MO), após os ensaios de polarização linear em soluções de NaCl 2,0 mol L⁻¹, em diferentes valores de pH.

4 MATERIAIS

Neste estudo, foram empregadas amostras de aço inoxidável duplex 2205, cedidas pelo Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). O procedimento experimental envolveu a realização de cálculos de diluição e análises termodinâmicas, a preparação da carga metálica e o processamento do material por meio de laminação a quente e a frio, seguido de tratamento térmico por recozimento, conforme apresentado esquematicamente na Figura 5.

Figura 5 – Esquema de obtenção do aço duplex 2205.



Fonte: DEMa, UFSCar.

A sequência de processamento termo-mecânico ilustrada (figura 5) é fundamental para o controle das propriedades microestruturais, mecânicas e eletroquímicas do material. A laminação a quente a 1100 °C promove elevada deformação plástica associada à recristalização dinâmica, favorecendo a homogeneização química e o refino de grão, além de contribuir para o equilíbrio entre as fases ferrítica e austenítica nos aços inoxidáveis duplex. O recozimento intermediário tem como principal função a remoção das tensões residuais geradas durante a conformação a quente, restaurando a ductilidade e preparando o material para a etapa subsequente. A laminação a frio permite o ajuste dimensional e melhora o acabamento superficial, porém introduz encruamento e tensões internas, que podem afetar negativamente o comportamento corrosivo caso não sejam tratadas. Por fim, o recozimento final a 1100 °C assegura a recristalização completa, a estabilização microestrutural e a redistribuição homogênea dos elementos de liga, garantindo condições adequadas para a formação de uma

película passiva estável e permitindo uma avaliação confiável da influência do teor de cobre no comportamento corrosivo do aço duplex.

A única distinção entre as amostras é a variação do teor de cobre, visto que essa adição não interferiu nos demais elementos presentes. A determinação da composição química das amostras foi efetuada utilizando um espectrômetro de emissão óptica, modelo PDA 7000, da marca Shimadzu. Os dados obtidos a partir dessa análise estão apresentados de forma detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço experimental 2205 em % em massa, sendo o Ferro o elemento de balanço.

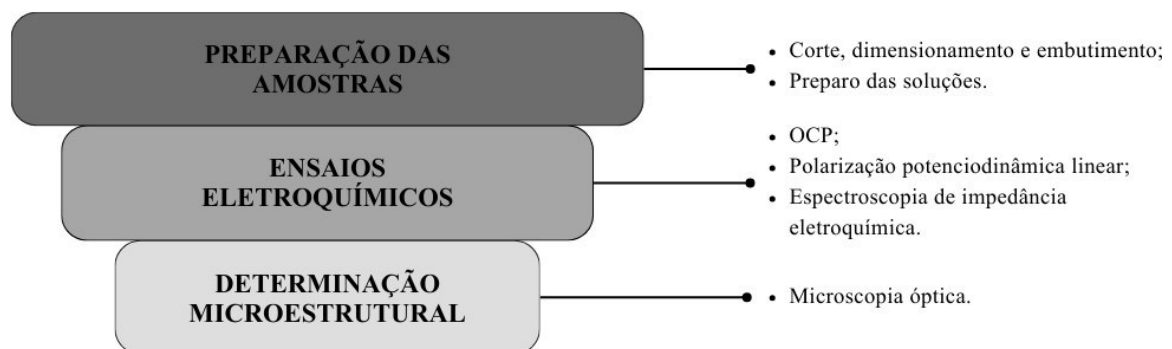
LIGA	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu
2205	0,0260	1,2600	0,0280	0,0030	0,4700	22,0200	5,3700	2,8900	0,0000	0,2550
2%Cu	0,0254	1,2296	0,0273	0,0029	0,4587	22,0200	5,3700	2,8203	0,0000	2,0000
4%Cu	0,0247	1,1948	0,0266	0,0028	0,4457	22,0200	5,3700	2,7404	0,0000	4,0000

Fonte: DEMa, UFSCar.

5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia adotada nesta pesquisa foi estruturada em etapas: (i) preparação das amostras; (ii) realização dos ensaios eletroquímicos; e (iii) caracterização estrutural. Todas as etapas foram conduzidas no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) da Universidade Federal do Ceará (UFC) e estão representadas na Figura 6, na forma de um fluxograma geral da metodologia do trabalho.

Figura 6 - Representação esquemática da metodologia de realização do seguinte trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

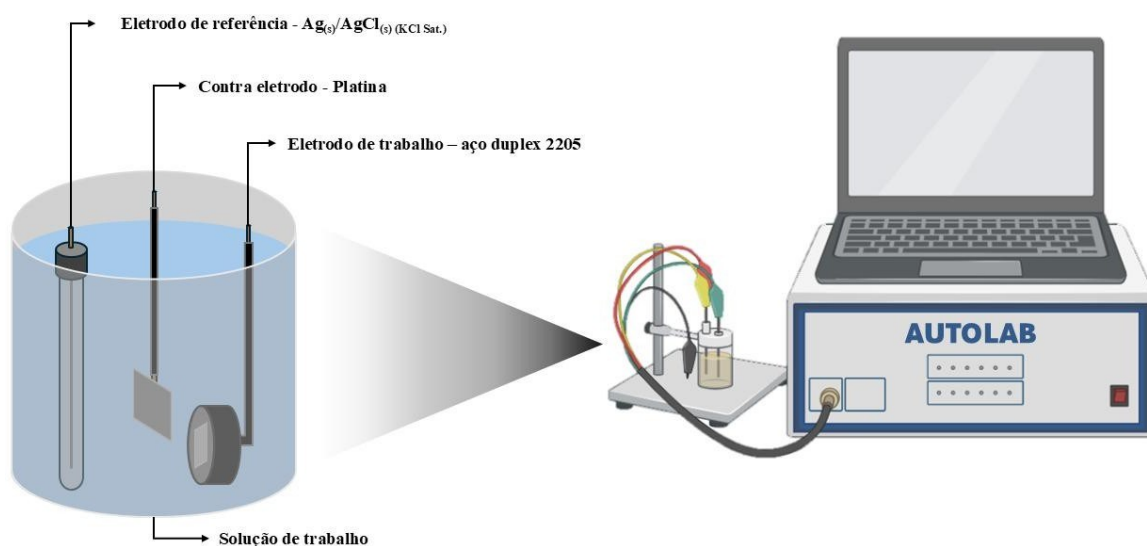
5.1 Análise eletroquímica

Para a realização dos ensaios eletroquímicos, utilizou-se um potenciostato/galvanostato modelo PGSTAT30 (Autolab, Metrohm-Eco Chemie), pertencente ao Laboratório de Pesquisa

em Corrosão (LPC) da Universidade Federal do Ceará (UFC), operado por meio do software Nova 2.1.

Os ensaios foram conduzidos em uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos, composta por eletrodo de trabalho (aço inoxidável duplex 2205), contra eletrodo de platina e eletrodo de referência Ag/AgCl (KCl Sat.), conforme ilustrado na Figura 7. Todas os ensaios eletroquímicos foram realizados em triplicata, com o objetivo de assegurar a reprodutibilidade dos resultados.

Figura 7 – Figura esquemática da célula eletroquímica utilizada ao longo da realização do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

Foram utilizados três eletrólitos de trabalho explicitados na Tabela 2. Os ajustes de pH foram feitos com o medidor de pH 914 pH/Condutivímetro (Metrohm), utilizando uma solução de HCl 1,0 mol L⁻¹.

Tabela 2 – Soluções eletrolíticas utilizadas ao longo do trabalho.

	Soluções	pH
1	NaCl 2,0 mol L ⁻¹	Neutro
2	NaCl 2,0 mol L ⁻¹ + HCl 1,0 mol L ⁻¹	4,0
3	NaCl 2,0 mol L ⁻¹ + HCl 1,0 mol L ⁻¹	2,0

Fonte: Elabora pela autora.

Para os ensaios eletroquímicos, as amostras foram inicialmente cortadas e soldadas a fios de cobre, a fim de estabelecer contato elétrico, em seguida foi feito o embutimento com resina epóxi e feito a cura durante 48h antes da realização de qualquer ensaio eletroquímico. Antes da realização de cada ensaio cada amostra foi lixada em lixas de granulometria 100, 220, 400 e 600, seguido de lavagem com água destilada e álcool etílico, com o intuito de desengordurar as amostras, e secas em ar quente.

5.1.1 Potencial de Circuito Aberto

O monitoramento de OCP foi realizado antes de todos os ensaios eletroquímicos presentes nesse trabalho, tendo duração de 3600s, no qual aferiu-se o potencial a cada 0,1s com registro de média a cada 5 medidas.

5.1.2 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Os ensaios de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) foram realizados após o monitoramento de OCP com duração de 1h para a estabilização do sistema. Foi utilizada frequência de 100 kHz a 0,01 Hz com amplitude de 0,01V e taxa de leitura de 5 pontos por década. Com os resultados obtidos de cada experimento foi possível obter diagramas de Bode de módulo de impedância e de ângulo de fase, dos quais é possível extrair informações sobre a resistência à corrosão.

5.1.3 Polarização Potenciodinâmica Linear

As polarizações lineares, assim como as medidas de EIE, também foram realizadas após os monitoramentos de OCP, em temperatura ambiente de 25°C, com velocidade de varredura de 0,5 mVs⁻¹, a partir do potencial de -0,2 V, em relação ao OCP, até 2,0 V, novamente em relação ao OCP. A partir dos resultados obtidos foram construídos gráficos de Log da densidade de corrente (*i*), o que possibilitou a interpretação do potencial de corrosão (E_{corr}).

Após cada ensaio de polarização as amostras foram lavadas com água destilada e álcool (etapa desengordurante), secas com ar quente e analisadas através de microscopia óptica, com o intuito de observar a extensão do processo corrosivo e, para fins comparativos, foram feitas fotos antes e depois do ensaio.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Monitoramento de Potencial de Circuito Aberto

A tabela 3 a seguir mostra os valores de média e desvio padrão obtidos através dos gráficos de potencial de circuito aberto (OCP) para as amostras estudadas no presente trabalho, aço duplex 2205 com diferentes adições de cobre. Pode-se observar que a liga 2205, com aproximadamente 0% de Cu em sua composição, possui a maior variação dos valores experimentais com a diminuição do pH do meio, enquanto as amostras com 2% e 4% de Cu houve uma pequena variação entre os meios.

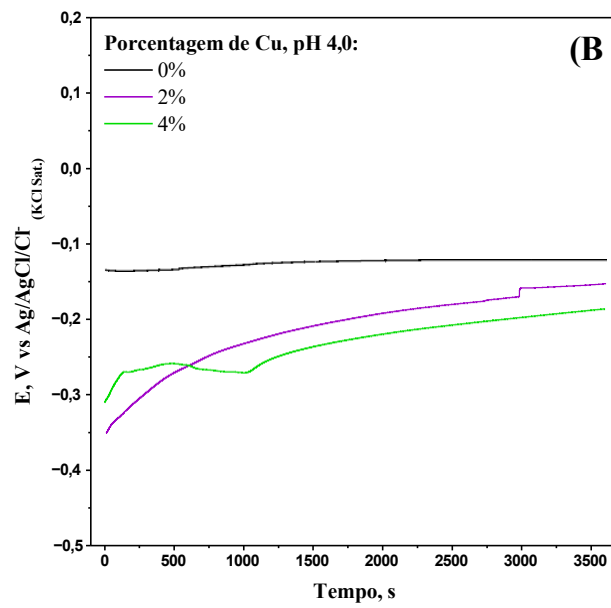
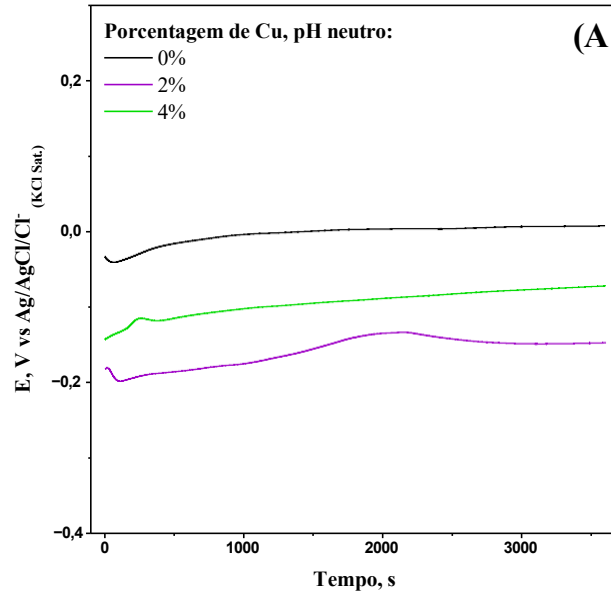
Tabela 3 – Média dos valores de OCP das amostras de aço duplex 2205 com diferentes adições de Cu em meio de NaCl 2 mol L⁻¹ com diferentes valores de pH.

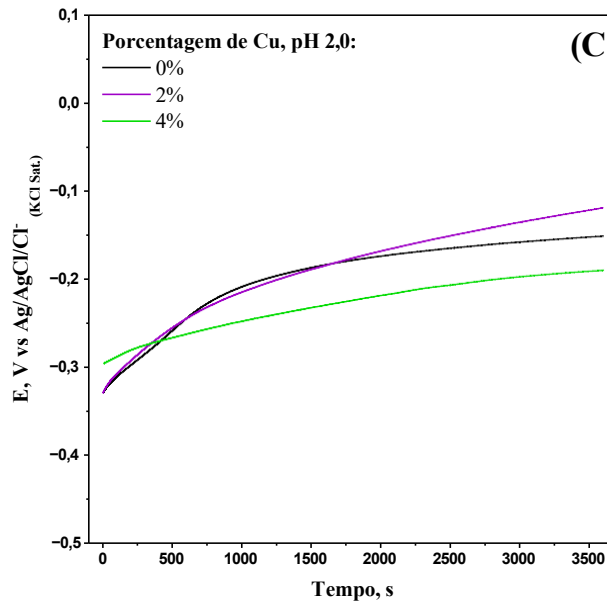
	pH neutro	pH 4,0	pH 2,0
2205	0,005±0,013	-0,149±0,027	-0,169±0,019
2%Cu	-0,117±0,015	-0,185±0,023	-0,103±0,039
4%Cu	-0,122±0,023	-0,178±0,007	-0,189±0,008

Fonte: Elaborado pela autora.

Por meio da análise da figura 8, gráficos dos ensaios de OCP feitos em 3600s, percebe-se que a redução do pH promove o deslocamento do OCP para valores mais negativos em todas as amostras, refletindo a alteração do equilíbrio eletroquímico na interface metal/solução em meios mais ácidos. Esse comportamento é mais pronunciado para o aço duplex 2205 sem adição de cobre, que apresenta a maior variação média de 0,164V do valor de OCP entre os três meios. Já as ligas contendo 2% e 4% de Cu exibem variações menos acentuadas dos potenciais com a diminuição do pH.

Figura 8 – Gráfico de OCP para as amostras com diferentes adições de Cu A) pH neutro, B) pH 4,0 e C) pH 2,0.





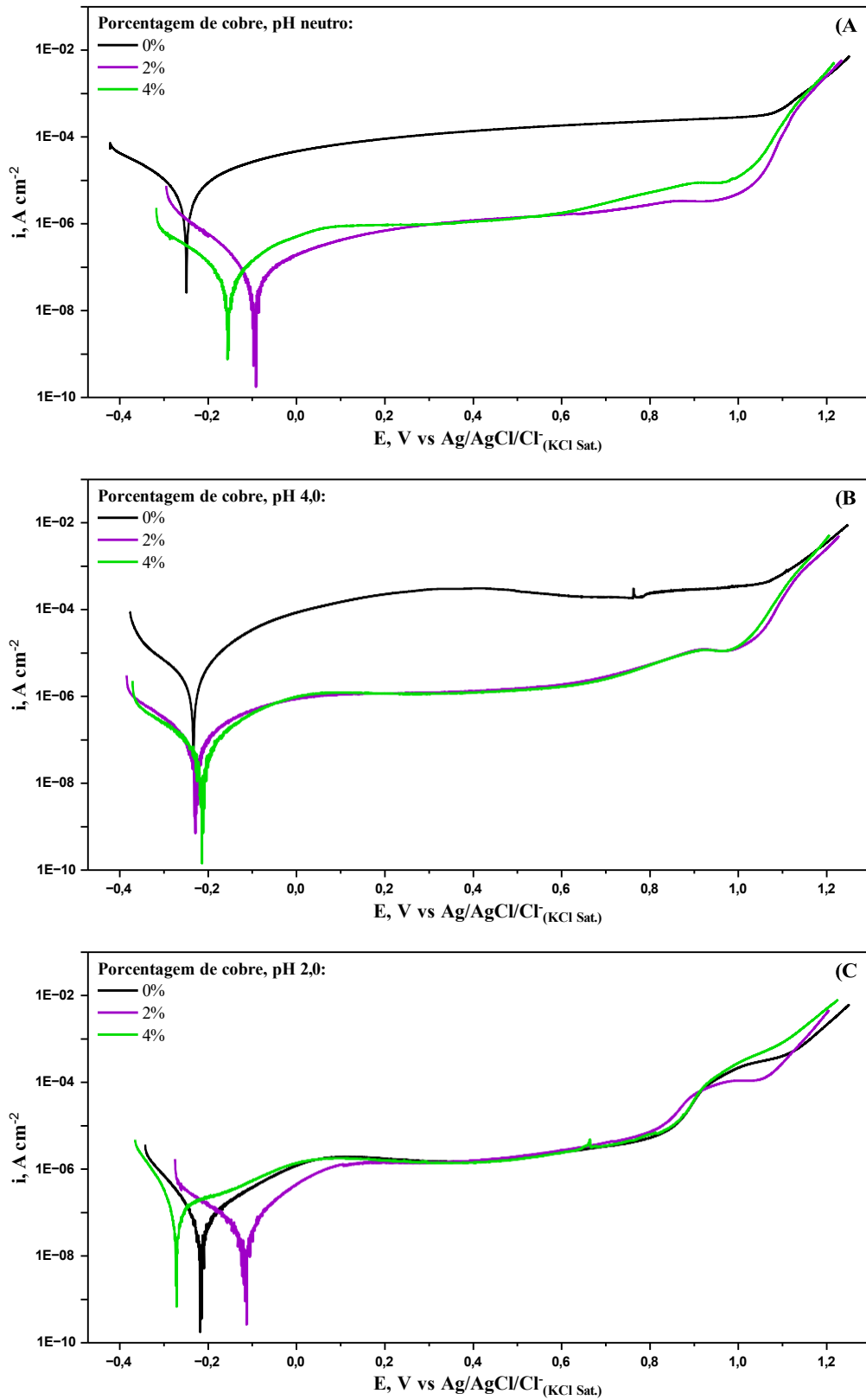
Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com *Gentil (2011)* e *Wolyneć (2003)*, o monitoramento do OCP ao longo do tempo permite avaliar a resposta inicial do material às condições do meio, sendo que menores oscilações do potencial indicam maior estabilidade eletroquímica da superfície. Assim, os resultados obtidos sugerem que a adição de cobre influencia o comportamento eletroquímico do aço duplex em condições ácidas, contribuindo para a redução da sensibilidade do potencial de circuito aberto às variações de pH.

6.2 Polarização Potenciodinâmica Linear

Os resultados obtidos por meio de ensaios eletroquímicos de polarização linear estão representados na figura 9, que corresponde as três amostras em solução de NaCl 2,0 mol L⁻¹ em pH neutro, pH 4,0 e pH 2,0.

Figura 9 – Curvas de polarização potenciodinâmica linear para as amostras com diferentes adições de Cu A) pH neutro, B) pH 4,0 e C) pH 2,0.



Fonte: Elaborada pela autora.

Uma informação importante que pode ser retirada das curvas apresentadas na figura 7 é o potencial de corrosão (E_{corr}), que corresponde ao potencial no qual as correntes anódica e catódica se igualam, representando o estado de equilíbrio eletroquímico do sistema. Para materiais passiváveis, como os aços inoxidáveis duplex, variações nos valores de E_{corr} podem refletir alterações na condição superficial do material e na estabilidade da película passiva em função do meio, valores mais nobres de E_{corr} , ou seja, mais positivos, podem estar associados à formação ou maior estabilidade da camada passiva no meio avaliado.

Na tabela 4 pode-se observar média e desvio padrão dos valores de E_{corr} para os três meios de estudo. É possível notar que para a mostra 2205, em todos os meios, o potencial se apresentou semelhante, considerando o desvio padrão, enquanto as outras amostras apresentaram uma maior variação.

Tabela 4 – Média dos valores de E_{corr} das amostras de aço duplex 2205 com diferentes adições de Cu em meio de NaCl 2 mol L⁻¹ em diferentes valores de pH, obtidos através das curvas de polarização.

	pH neutro	pH 4,0	pH 2,0
2205	-0,236±0,079	-0,200±0,033	-0,252±0,034
2%Cu	-0,105±0,016	-0,211±0,028	-0,114±0,044
4%Cu	-0,162±0,027	-0,206±0,007	-0,292±0,016

Fonte: Elaborado pela autora.

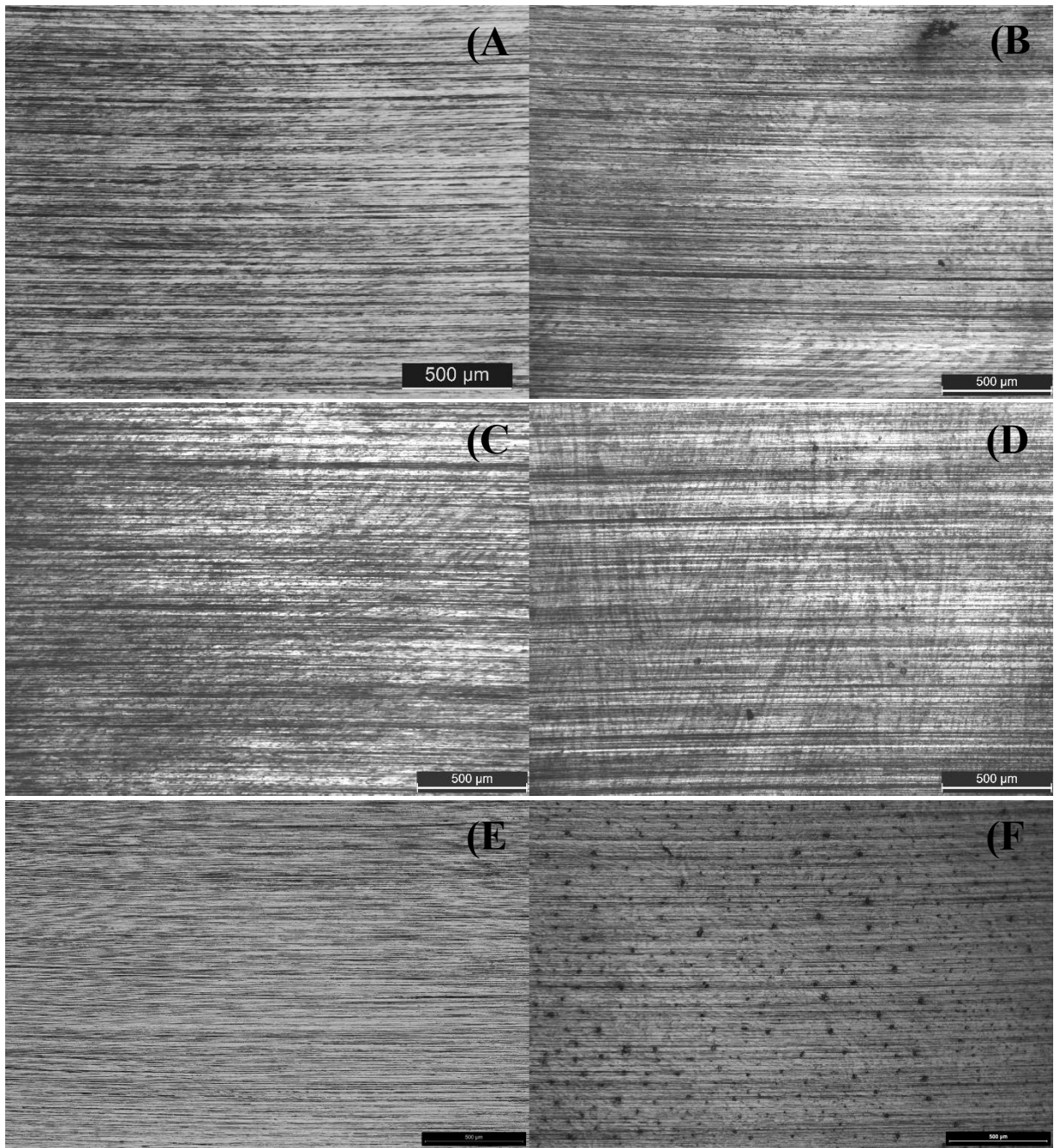
Ao comparar as amostras com diferentes teores de Cu em um mesmo meio, observam-se diferenças significativas nos valores de E_{corr} . Em pH neutro, a amostra sem adição de Cu apresentou o valor de E_{corr} menos nobre, associado a menor resistência à corrosão, enquanto a amostra contendo 2% de Cu exibiu o valor mais nobre entre as três ligas analisadas. Esse comportamento pode ser associado a uma resposta eletroquímica mais estável da liga com 2% de Cu, resultado compatível com relatos da literatura (*Lopes et al, 2019*), detalhada a seguir, que indicam efeitos benéficos da adição controlada do cobre como elemento de liga. Por outro lado, a amostra com 4% de Cu apresentou valores intermediários de E_{corr} , contrariando a dedução inicial de que o aumento contínuo do teor de cobre resultaria em melhoria progressiva do desempenho eletroquímico. De acordo com *Fontana (1986)* e *Lopes (2019)*, para aços inoxidáveis duplex, a adição de cobre é geralmente limitada a cerca de 2%, uma vez que teores superiores podem levar a efeitos desfavoráveis, como alterações na estabilidade da camada passiva e no equilíbrio microestrutural, o que pode comprometer o desempenho do material em determinados meios corrosivos.

No meio com pH 4,0 observou-se maior estabilidade nos valores de E_{corr} entre as três variações do material estudado. As médias obtidas a partir das curvas de polarização apresentaram valores próximos entre si, não sendo possível estabelecer diferenças significativas no comportamento eletroquímico das ligas avaliadas nesse meio. Dessa forma, com base apenas nos valores de E_{corr} , não é possível tirar conclusões significativas quanto à influência do teor de Cu nessas condições.

No meio com pH 2,0, considerado o mais agressivo, observou-se a maior variação nos valores de E_{corr} . A amostra contendo 2% de Cu apresentou potenciais mais nobres em relação às demais, sendo associada a uma condição eletroquímica mais estável. Por outro lado, a amostra com 4% de Cu apresentou o valor de E_{corr} menos nobre entre os materiais avaliados, reforçando as hipóteses discutidas por *Lizlovs (1966)*, mostraram que o efeito do Cu na passividade depende do teor de Mo, sendo prejudicial em aços com 1% de Mo e benéfico quando o teor de Mo é de 3%, e *Jeon (2014)*, que diz que na região passiva ($\sim -0,6 V_{SCE}$), a adição de cobre prejudicou a passivação da liga, devido à formação de inclusões de óxidos ricos em cromo que atuam como defeitos na película passiva, reduzindo a resistência à corrosão.

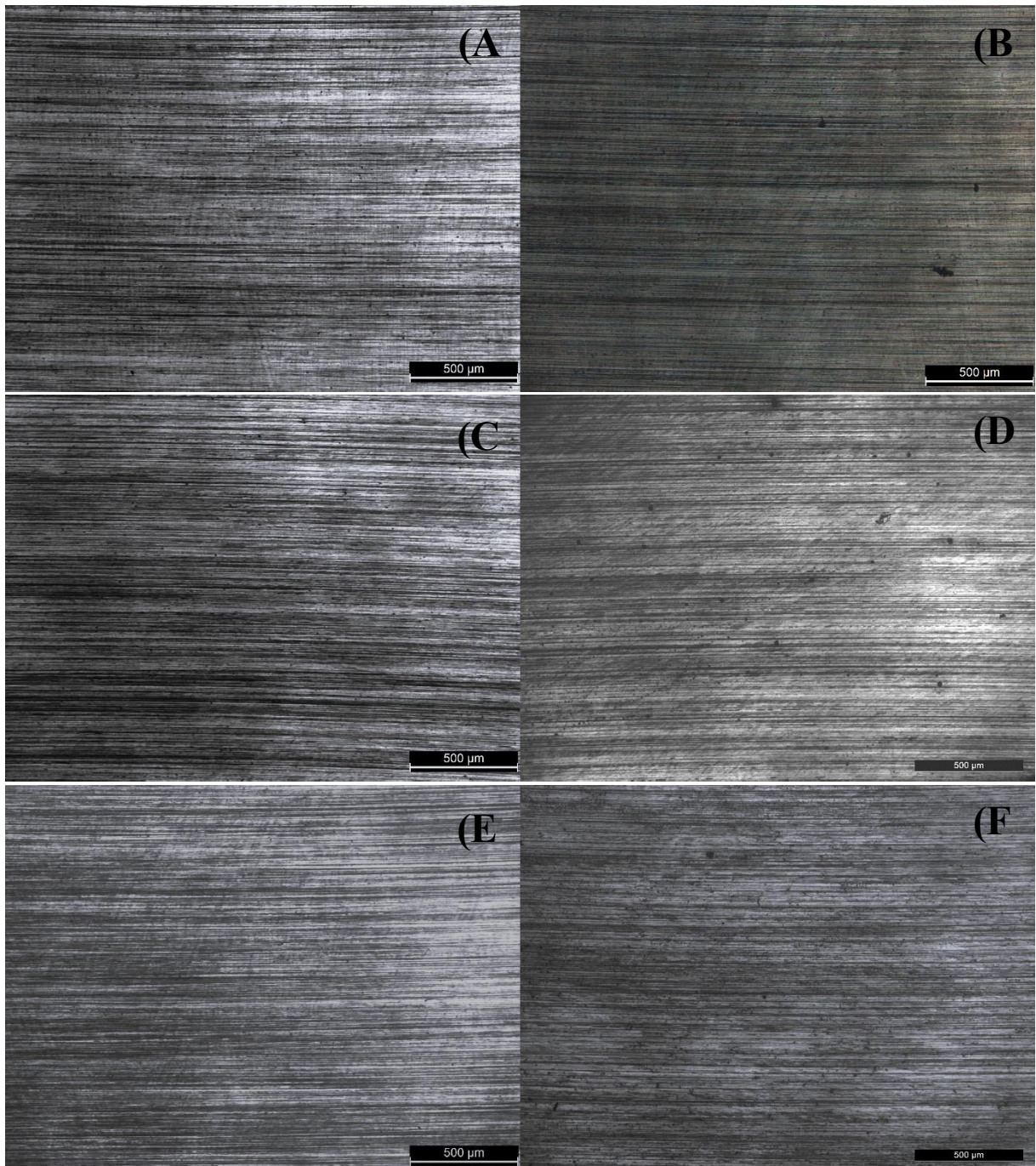
As Figuras 10, 11 e 12 apresentam as micrografias ópticas (MO) obtidas por microscopia óptica das amostras sem cobre, 2% de Cu e 4% de Cu, respectivamente, analisadas antes e após os ensaios de polarização linear, realizados em solução de NaCl 2,0 mol L⁻¹ sob diferentes condições de pH. A análise das superfícies revela a ocorrência predominante de corrosão por pites, evidenciando que a corrosão localizada constitui o principal mecanismo de degradação do material nessas condições. Tal comportamento é típico de aços inoxidáveis, cuja resistência à corrosão está relacionada à formação de uma película passiva, a qual pode ser rompida em meios agressivos, favorecendo o surgimento de ataques localizados.

Figura 10 – Micrografias ópticas da amostra sem adição de cobre na lente 5x, 500 μm A) pH neutro pré-polarização, B) pH neutro pós-polarização, C) pH 4,0 pré-polarização, D) pH 4,0 pós-polarização, E) pH 2,0 pré-polarização e F) pH 2,0 pós-polarização.



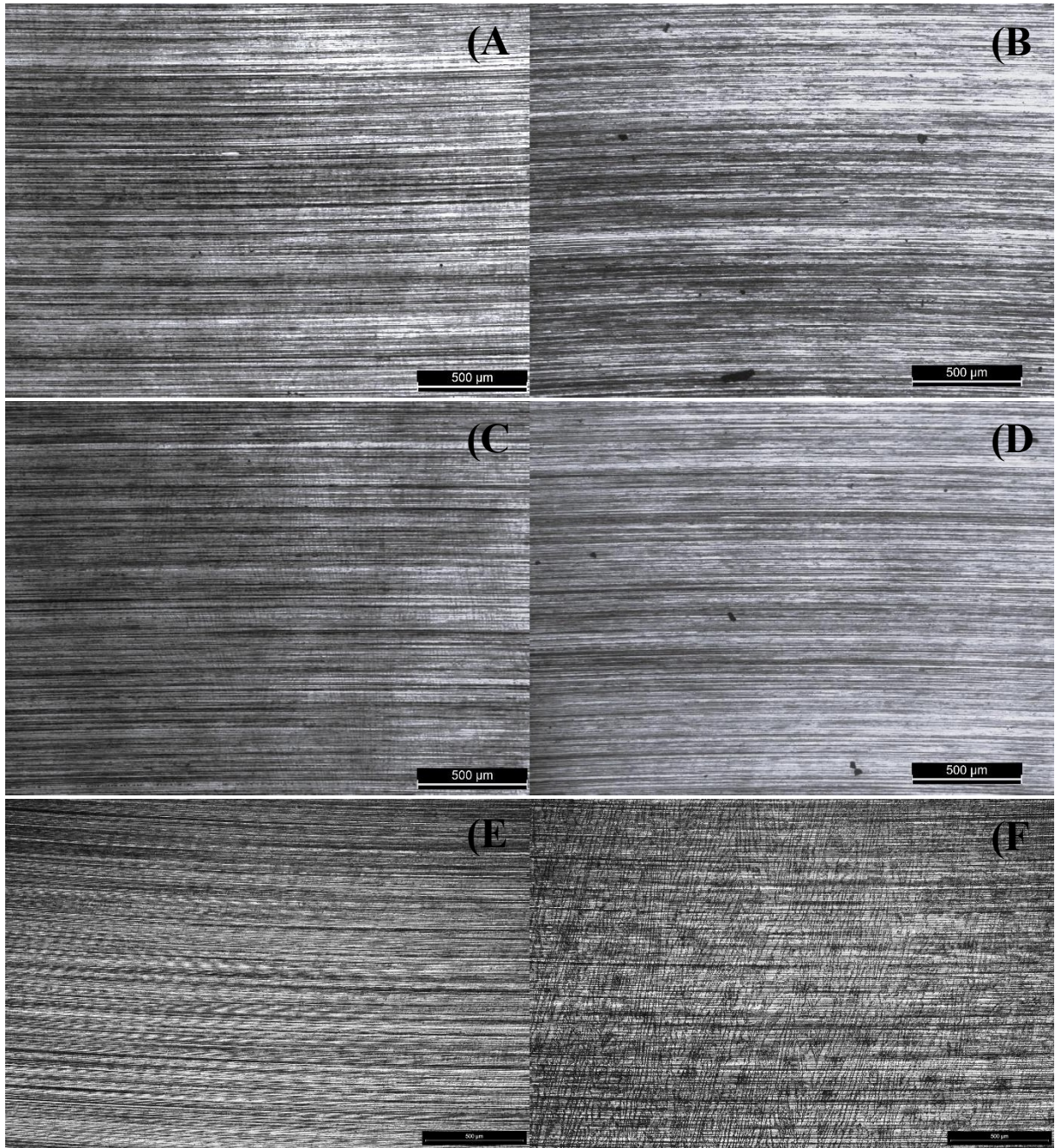
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 11 – Micrografias ópticas da amostra com 2% de Cu na lente 5x, 500 μm A) pH neutro pré-polarização, B) pH neutro pós-polarização, C) pH 4,0 pré-polarização, D) pH 4,0 pós-polarização, E) pH 2,0 pré-polarização e F) pH 2,0 pós-polarização.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 – Micrografias ópticas da amostra com 4% de Cu na lente 5x, 500 μm A) pH neutro pré-polarização, B) pH neutro pós-polarização, C) pH 4,0 pré-polarização, D) pH 4,0 pós-polarização, E) pH 2,0 pré-polarização e F) pH 2,0 pós-polarização.



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise das imagens obtidas por microscopia óptica permite observar, na Figura 10, que a amostra sem adição de Cu apresenta uma evolução gradual na quantidade de pites à medida que ocorre a redução do pH do meio, evidenciando a diminuição da resistência à corrosão do material. De forma semelhante, a amostra contendo 4% de Cu, figura 12, também apresentou um aumento significativo do ataque corrosivo com a diminuição do pH,

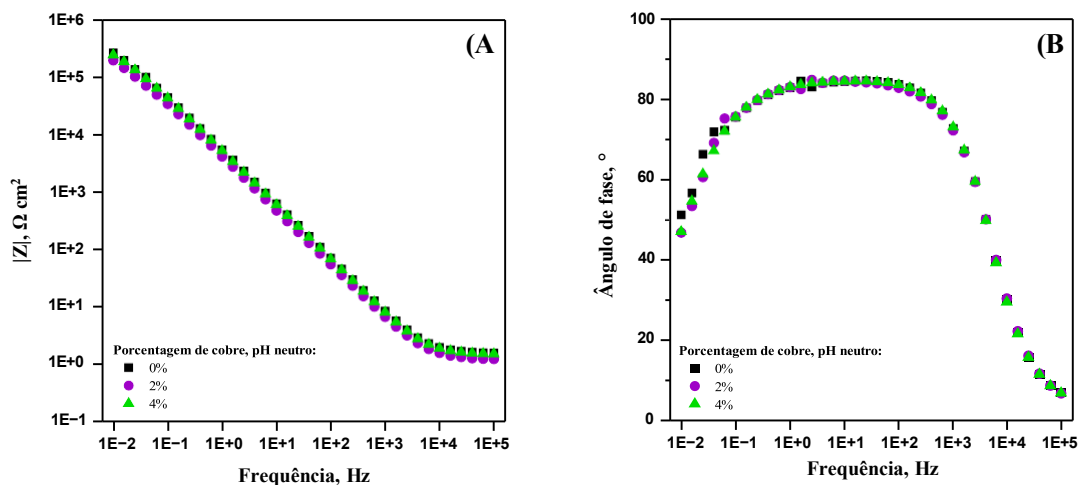
comportamento que está em concordância com as hipóteses discutidas por *Lizlovs (1966)*, *Jeon et al. (2014)* e *Fontana (1986)*. Por outro lado, a amostra com 2% de Cu, figura 11, apresentou maior estabilidade, com pouca variação na quantidade e tamanho de pites entre os diferentes meios avaliados, indicando desempenho superior em termos de resistência à corrosão quando comparada às demais composições.

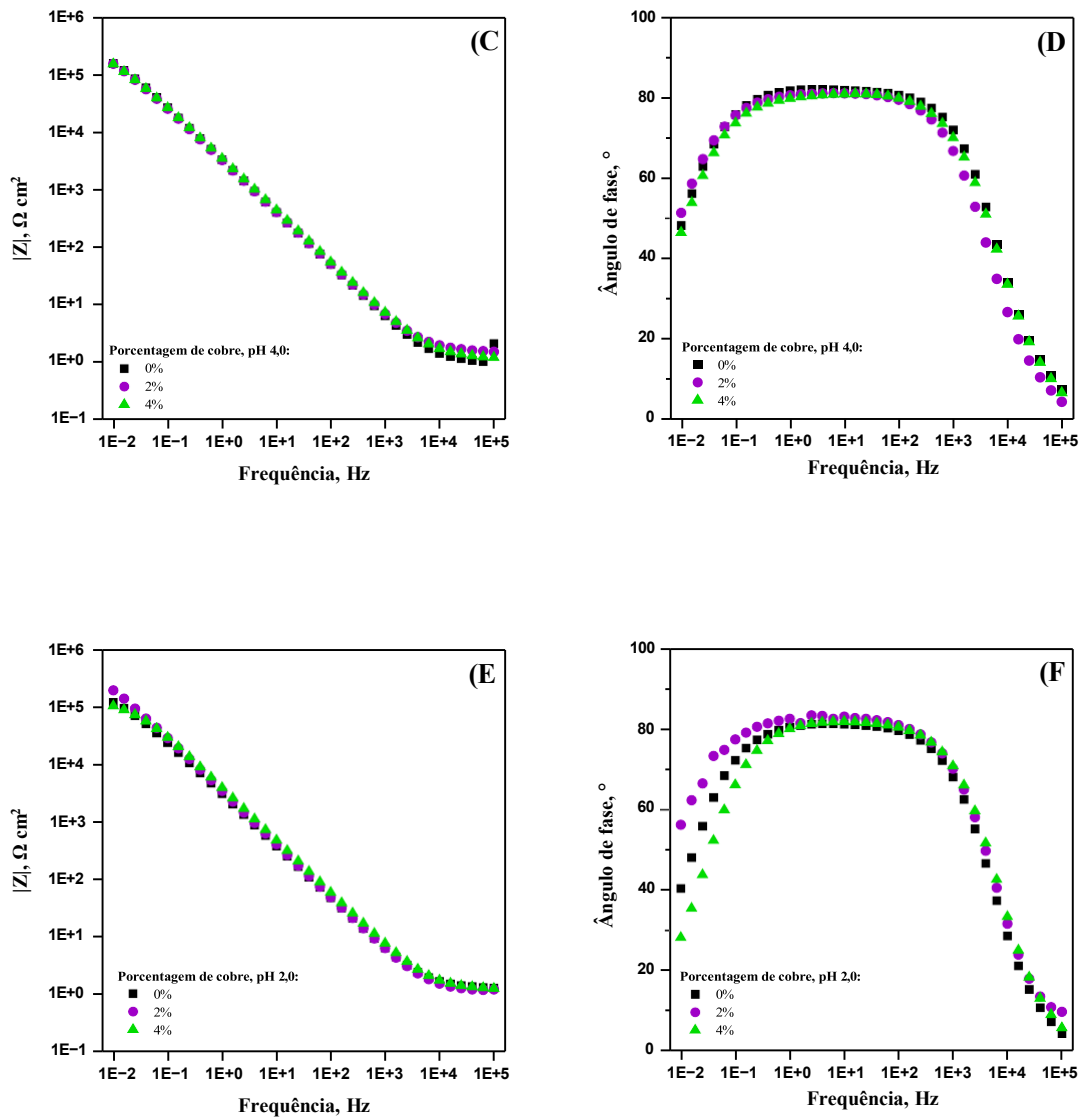
6.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foi empregada neste trabalho como ferramenta complementar para a avaliação do comportamento corrosivo das amostras de aço inoxidável duplex 2205 com diferentes teores de cobre. Os resultados foram analisados a partir dos diagramas de Bode, considerando o módulo da impedância ($|Z|$) e o ângulo de fase em função da frequência. Essa abordagem permite investigar os processos eletroquímicos que ocorrem na interface metal/eletrólito, bem como avaliar a integridade e a eficiência da película passiva formada na superfície do material. Em particular, variações no módulo de impedância em baixas frequências e alterações no ângulo de fase fornecem informações relevantes sobre a resistência à corrosão e possíveis modificações na resposta eletroquímica associadas às diferentes condições de pH e aos teores de cobre avaliados (*Roberge, 2019; Gentil, 2011*).

Na figura 13 pode-se observar gráficos de bode módulo de impedância e ângulo de fase obtidos por meio de EIE, resultados das amostras com diferentes adições de cobre em meio de NaCl 2,0 mol L⁻¹ em pH neutro, pH 4,0 e pH 2,0.

Figura 13 - Diagramas de Bode para as amostras com diferentes adições de cobre A) Bode módulo pH neutro, B) Bode fase pH, neutro, C) Bode módulo pH 4,0, D) Bode fase pH 4,0, E) Bode módulo pH 2,0 e F) Bode fase pH 2,0.





Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 5 pode-se observar média e desvio padrão dos valores módulo de impedância ($|Z|$) apresentados nas Figuras 13-A, 13-C e 13-E, observa-se que, nos dois primeiros meios avaliados, pH neutro e pH 4,0, não há diferenças significativas nos valores de $|Z|$ que permitam distinguir de forma clara a resistividade eletroquímica entre as amostras. Entretanto, no meio mais agressivo, com pH 2,0, é possível identificar uma diferença mais pronunciada, na qual a amostra contendo 2% de Cu apresenta valores de módulo de impedância superiores aos das demais composições. Esse comportamento indica maior estabilidade da película passiva formada e, conseqüentemente, maior resistência à corrosão nessas condições.

Tabela 5 – Média dos valores de módulo de impedância ($|Z|$) das amostras de aço duplex 2205 com diferentes adições de Cu em meio de NaCl 2 mol L⁻¹ em diferentes valores de pH, obtidos através dos gráficos de Bode.

	pH neutro	pH 4,0	pH 2,0
2205	203962 ±44994	151452±10760	127043±9402
2%Cu	188920±1952	153892±3202	138403±37474
4%Cu	191965±33872	155996±929	116119±14419

Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos diagramas de Bode do ângulo de fase, apresentados nas Figuras 13-B, 13-D e 13-F, observa-se que todas as amostras exibem ângulos de fase elevados, situados predominantemente entre -80° e -90° , ao longo de uma ampla faixa de frequências. Esse comportamento é característico de sistemas passivados e está associado à presença de uma camada passiva estável, como esperado para aços inoxidáveis. Reduções no valor do ângulo de fase ou o estreitamento da faixa de frequências com comportamento capacitivo podem indicar a presença de defeitos, heterogeneidades ou processos de degradação da película protetora, favorecendo o início de corrosão localizada (Roberge, 2019).

De forma geral, os resultados de EIE corroboram as tendências observadas nos ensaios eletroquímicos previamente discutidos, evidenciando a forte influência do pH e do teor de cobre no comportamento corrosivo do aço inoxidável duplex 2205. Em meios de menor agressividade, como pH neutro e pH 4,0, as respostas eletroquímicas das amostras foram semelhantes, indicando que a película passiva permanece relativamente estável independentemente do teor de Cu. Entretanto, no meio mais ácido (pH 2,0), a amostra com 2% de Cu destacou-se por apresentar maiores valores de $|Z|$ em baixas frequências e manutenção de elevados ângulos de fase, o que sugere maior resistência à transferência de carga e melhor integridade da camada passiva. Esses resultados reforçam o efeito benéfico de teores moderados de cobre em condições mais agressivas, ao passo que a ausência de melhoria significativa para a amostra com 4% de Cu indica que teores elevados desse elemento não resultam necessariamente em maior resistência à corrosão, podendo comprometer a estabilidade eletroquímica do material.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliada a influência da adição de diferentes teores de cobre no comportamento corrosivo do aço inoxidável duplex 2205 em meio aquoso sob diferentes condições de pH, por meio de técnicas eletroquímicas e análise microestrutural. A união dos resultados obtidos à 25 °C por potencial de circuito aberto, polarização linear, espectroscopia de impedância eletroquímica e microscopia óptica possibilitou uma compreensão consistente do desempenho das ligas estudadas em meios de diferentes graus de acidez.

Os ensaios de potencial de circuito aberto evidenciaram que a redução do pH promoveu o deslocamento dos potenciais para valores mais negativos em todas as amostras, refletindo o aumento da agressividade do meio. Entretanto, as ligas contendo cobre apresentaram menores variações de OCP com a diminuição do pH, indicando maior estabilidade eletroquímica da superfície quando comparadas à liga sem adição desse elemento.

A análise das curvas de polarização permitiu avaliar o potencial de corrosão e o comportamento eletroquímico das ligas. Embora não tenha sido observado um padrão único de variação de E_{corr} para uma mesma amostra em função do pH, a comparação entre diferentes composições em um mesmo meio indicou que a liga contendo 2% de Cu apresentou, de forma recorrente, valores de E_{corr} mais nobres, sobretudo no meio mais ácido. Em contrapartida, a amostra com 4% de Cu apresentou potenciais menos nobres, sugerindo que teores elevados de cobre não resultam necessariamente em melhoria do desempenho eletroquímico, em concordância com a literatura.

As análises por microscopia óptica corroboraram os resultados eletroquímicos, evidenciando a ocorrência predominante de corrosão localizada por pites. A severidade do ataque aumentou com a redução do pH, sendo mais acentuada nas amostras sem cobre e com 4% de Cu. Por outro lado, a liga com 2% de Cu apresentou maior estabilidade superficial, com menor variação na quantidade e no tamanho dos pites, indicando melhor desempenho frente às condições avaliadas.

Os ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica reforçaram essas observações, especialmente no meio mais ácido, no qual a amostra com 2% de Cu apresentou maiores valores de módulo de impedância em baixas frequências, associados a maior resistência à corrosão e maior estabilidade da película passiva. Os diagramas de Bode do ângulo de fase apresentaram comportamento predominantemente capacitivo em todas as amostras, característico de materiais passiváveis.

De modo geral, o presente estudo possui caráter qualitativo, uma vez que a interpretação dos resultados se baseou na análise comparativa de tendências eletroquímicas e morfológicas,

e uma determinação quantitativa com a apresentação de valores de OCP e E_{corr} . Essa abordagem mostrou-se adequada para identificar o efeito do teor de cobre e da acidez do meio no comportamento corrosivo do aço inoxidável duplex 2205, permitindo estabelecer relações consistentes entre pH, estabilidade da película passiva e resposta eletroquímica do material.

Além disso, os resultados evidenciam a importância do pH como fator determinante no processo corrosivo. Conforme discutido por Gentil (2011), em meios próximos à neutralidade, a corrosão tende a ser menos sensível às variações de pH, enquanto em meios ácidos a participação da redução de íons hidrogênio intensifica as reações eletroquímicas e reduz a estabilidade dos filmes protetores. Esse comportamento é coerente com os resultados obtidos neste trabalho, nos quais a diminuição do pH esteve associada ao aumento da instabilidade eletroquímica e da corrosão localizada.

8 PERSPECTIVAS FUTURAS

Como continuidade deste trabalho, sugere-se a realização de análises quantitativas complementares, incluindo o cálculo da densidade de corrente de corrosão com base na Lei de Faraday, a determinação da taxa de corrosão e a obtenção da resistência à polarização (R_p) a partir dos dados de espectroscopia de impedância eletroquímica. A incorporação desses parâmetros permitirá uma avaliação quantitativa mais precisa do desempenho corrosivo das ligas, complementando as análises qualitativas já realizadas.

Adicionalmente, estudos futuros podem aprofundar a investigação da influência do pH por meio da ampliação da faixa de valores avaliados e da análise da evolução temporal dos ensaios eletroquímicos, possibilitando uma melhor compreensão dos mecanismos de passivação e repassivação do aço inoxidável duplex. A associação dessas análises com técnicas avançadas de caracterização superficial pode contribuir para elucidar, de forma mais completa, o papel do cobre como elemento de liga em ambientes de elevada acidez.

REFERÊNCIAS

- Teixeira, Flaviana, et al. *Inovação Na Indústria Do Aço Inoxidável: Processo Produtivo Do Aço Colorido*. May 2017.
- Chen, Lindou, Hua Tan, Zhiyu Wang, Jin Li, and Yiming Jiang. 2012. “**Influence of Cooling Rate on Microstructure Evolution and Pitting Corrosion Resistance in the Simulated Heat-Affected Zone of 2304 Duplex Stainless Steels.**” *Corros Sci* 58 (May): 168–74.
- Chiaverini, Vicente. 1988. *AÇOS E FERROS FUNDIDOS - Vicente Chiaverini*.
- Davis, Joseph. 1994. *ASM Specialty Handbook® Stainless Steels*.
- Dillon C. P. 1995. *Corrosion Resistance of Stainless Steels*.
- E. A. Lizlovs. 1966. *Corrosion*. 10th ed. Vol. 22.
- Fontana, Mars. 1986. *Mars Fontana-Corrosion Engineering*.
- Gentil, Vicente. *Corrosão*. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- Gunn, Robert. 1997. *Duplex Stainless Steels*.
- “*História Do Aço*”. Instituto Aço Brasil, 2024. www.acobrasil.org.br/site/historia-do-aco/.
- Jeon, Soon-Hyeok, et al. “**Effects of Copper Addition on the Passivity and Corrosion Behavior of 27Cr-7Ni Hyper Duplex Stainless Steels in Sulfuric Acid Solution.**” *Materials Transactions*, vol. 56, 2014, pp. 78–84, <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2014233>].
- Jones, Denny. 2.ed. 1996. *PRINCIPLES AND PREVENTION OF CORROSION*
- Roberge, Pierre R. 2019. *Handbook of Corrosion Engineering*. McGraw-Hill Education.
- Sedriks, John. 1996. *Corrosion of Stainless Steels*.
- Silva and Mei. 2010. *AÇOS E SUAS LIGAS ESPECIAIS*.
- Wolyneć, Stephan. 2003. *Técnicas Eletroquímicas Em Corrosão*.

Senatore, Marcelo, Leandro Finzetto, and Eduardo Perea. 2007. *Estudo Comparativo Entre Os Aços Inoxidáveis Dúplex e Os Inoxidáveis AISI 304L/316L Ligas Inoxidáveis*.

The Atlas Steels Technical Handbook of Stainless Steels. 2013.

Chen, Yuefeng, et al. “**Evaluation of Pitting Corrosion in Duplex Stainless Steel Fe20Cr9Ni for Nuclear Power Application.**” *Acta Materialia*, vol. 197, 15 Sept. 2020, pp. 172–183, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.07.046>.

Marcus, Philippe. *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*. 2.ed. 2002.

Lopes, Mirelle, et al. “**The Effect of Copper Addition on the Corrosion Resistance of Cast Duplex Stainless Steel.**” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 2, 18 Mar. 2019, pp. 2107–2119, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.018>.