



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

BRUNO GOMES LINHARES

ESTUDO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO
QN1803 EM AMBIENTES COM ALTO TEOR DE CLORETO

FORTALEZA – CE

2024

BRUNO GOMES LINHARES

ESTUDO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO
QN1803 EM AMBIENTES COM ALTO TEOR DE CLORETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.
Área de Concentração: Degradação de materiais.

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.

FORTALEZA – CE

2024

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

- L728e Linhares, Bruno Gomes.
Estudo da resistência à corrosão do aço inoxidável austenítico QN1803 em ambientes com alto teor de cloreto / Bruno Gomes Linhares. – 2024.
73 f.: il. color.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Walney Silva Araujo.
1. Aço inoxidável austenítico. 2. Baixo teor de níquel. 3. QN1803. 4. Resistência à corrosão. I. Título.
CDD 620.11
-

BRUNO GOMES LINHARES

ESTUDO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO
QN1803 EM AMBIENTES COM ALTO TEOR DE CLORETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.
Área de Concentração: Degradação de materiais.

Aprovada em: 02/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Sérgio Souto Maior Tavares
Universidade Federal Fluminense (UFF)

A Deus.

À minha família.

À Gabrielle.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conduzir ao longo desta jornada cheia de desafios, sempre me proporcionando força e coragem.

À minha família, por me educar e me apoiar incondicionalmente, inspirando-me a ser a melhor versão de mim mesmo.

À minha noiva, Gabrielle, por ser o meu grande apoio e sustento em todas as batalhas da vida. Seu amor e paciência foram fundamentais.

À Universidade Federal do Ceará, por ser um verdadeiro universo de possibilidades de aprendizado para todos os estudantes e para a sociedade.

Ao Professor Doutor Walney Silva Araújo, pela orientação exemplar e pela oportunidade de explorar o mundo da pesquisa científica. Seu suporte foi essencial para o desenvolvimento desta dissertação.

À equipe do Laboratório de Pesquisa em Corrosão, por me acolher e me introduzir ao fascinante campo da pesquisa em corrosão, além de me apoiar para a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais e Laboratório de Ensaios Mecânicos, da Universidade Federal do Ceará, pelo suporte no preparo e análise dos materiais.

À Universidade Federal Fluminense, na pessoa do Prof. Dr. Sérgio Souto Maior Tavares, pela colaboração com o seu grande conhecimento e pela utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura.

À CAPES, pelo apoio financeiro, e CNPQ e FUNCAP, pelo incentivo que tornaram este trabalho possível. Agradeço profundamente por esse suporte.

Aos professores membros da banca examinadora, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições que enriqueceram esta pesquisa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação, deixo meu sincero agradecimento.

“Orai como se tudo dependesse de Deus, e
trabalhai como se tudo dependesse de vós.”
(Santo Inácio de Loyola)

RESUMO

Os aços inoxidáveis desempenham um papel fundamental em vários setores, desde produtos do cotidiano até componentes industriais e de construção, devido às suas propriedades de dureza, ductilidade e resistência à corrosão. A classe austenítica é a mais popular por sua adaptabilidade a ambientes corrosivos, característica atribuída ao teor de cromo e níquel em sua composição. No entanto, o aumento do consumo de níquel, especialmente na fabricação de aços inoxidáveis e na produção de baterias para automóveis elétricos, está contribuindo para uma escassez desse recurso e elevando seu preço de aquisição. Esse cenário, juntamente com os potenciais riscos à saúde associados ao contato direto com o níquel, está impulsionando a busca por novos aços inoxidáveis austeníticos com menor teor de níquel, preservando ou aprimorando as propriedades dos tradicionais, como UNS S30400 e UNS S31600. Para atender a essa demanda, foi desenvolvido o aço inoxidável austenítico QN1803, com teor reduzido de níquel, compensado por um maior teor de manganês e nitrogênio, preservando a estabilidade da fase austenítica, afetada pela redução do níquel. Esse material oferece maior resistência mecânica e menores custos de produção em comparação com os aços inoxidáveis austeníticos convencionais. No entanto, ainda há informações limitadas na literatura sobre seu comportamento eletroquímico. Portanto, este estudo visa avaliar a resistência à corrosão do aço QN1803 em condições de alto teor de cloreto. A metodologia inclui técnicas eletroquímicas como potencial de circuito aberto (OCP), polarização potenciodinâmica linear, cronoamperometria, temperatura crítica de pite (CPT), espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e capacitância de Mott-Schottky, todas realizadas em solução de *NaCl 2 M*; análise da resistência à corrosão por pite de acordo com as normas ASTM G48-A; e caracterização mecânica e microestrutural por microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e dureza Rockwell B. Esses testes também foram conduzidos com os aços UNS S30400 e UNS S31600 para comparação de desempenho com o QN1803. Em conclusão, os resultados indicam que o aço inoxidável austenítico QN1803 é uma alternativa viável e promissora aos aços UNS S30400 e UNS S31600. Sua capacidade de formar um filme passivo estável e resistente, combinada com uma menor propensão à corrosão localizada, garante significativa durabilidade e vida útil para componentes metálicos em ambientes agressivos com alta salinidade.

Palavras-chave: aço inoxidável austenítico; baixo teor de níquel; QN1803; resistência à corrosão.

ABSTRACT

Stainless steels play a fundamental role in various sectors, from everyday products to industrial and construction components, due to their hardness, ductility, and corrosion resistance properties. The austenitic class is the most popular due to its adaptability to corrosive environments, which is attributed to the chromium and nickel content in their composition. However, the increased consumption of nickel, particularly in stainless steels manufacturing and the production of batteries for electric automobiles, is affecting a shortage of this resource and raising the acquisition price. This scenario, along with the potential health risks associated with direct contact with nickel, is driving the search for new austenitic stainless steels with lower nickel content while preserving or enhancing the properties of traditional ones, such as UNS S30400 and UNS S31600. To support this demand, the austenitic stainless steel QN1803 was developed with reduced nickel content, compensated by higher manganese and nitrogen content, preserving the stability of the austenitic phase, affected by nickel reduction. This material offers enhanced mechanical strength and reduced production costs compared to conventional austenitic stainless steels. Nevertheless, there is still limited information in the literature regarding its electrochemical behavior. Therefore, this study aims to assess the corrosion resistance of QN1803 steel as exposed to circumstances with high chloride content. The methodology includes electrochemical techniques such as open circuit potential (OCP), linear potentiodynamic polarization, chronoamperometry, critical pitting temperature (CPT), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and Mott-Schottky capacitance, all performed in a 2 M NaCl solution; pitting corrosion resistance analysis following ASTM G48-A standards; and mechanical and microstructural characterization by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and Rockwell B hardness. These tests were also conducted with UNS S30400 and UNS S31600 steels for performance comparison with QN1803. To conclude, the results indicate that QN1803 austenitic stainless steel is a viable and promising alternative to UNS S30400 and UNS S31600 steels. Its ability to form a stable and resistant passive film, combined with a lower propensity for localized corrosion, ensures significant durability and service life for metallic components in aggressive environments with high salinity.

Keywords: austenitic stainless steel; low nickel content; QN1803; corrosion resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Grupos de aços inoxidáveis classificados com base na relação entre percentuais de cromo e de níquel.....	20
Figura 2	– Variações de morfologia de corrosão localizada por pites observados em aços inoxidáveis.....	23
Figura 3	– Ilustração de um comportamento padrão de curva de polarização potenciodinâmica linear anódica.....	24
Figura 4	– Gráfico esquemático da resposta geral de capacitância dos aços inoxidáveis conforme modelo Mott-Schottky.....	29
Figura 5	– Esquema ilustrativo da montagem da célula eletroquímica utilizada nos ensaios eletroquímicos.....	33
Figura 6	– Diagrama de Schaeffler-Delong com indicação da microestrutura predominante dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	37
Figura 7	– Micrografias ópticas dos aços (a) UNS S30400, (b) UNS S31600 e (c) QN1803. Reagente: ácido oxálico 10%. Aumento: 200x.....	38
Figura 8	– Análise de MEV em interior de pite do aço QN1803 com ataque intergranular, característico de sensibilização.....	39
Figura 9	– Curvas de monitoramento de potencial de circuito aberto dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	40
Figura 10	– Curvas de polarização potenciodinâmica linear dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803 com eixos em (a) potencial e em (b) sobrepotencial.....	42
Figura 11	– Micrografias ópticas dos aços UNS S30400 (a) pré-polarização e (b) pós-polarização; UNS S31600 (c) pré-polarização e (d) pós-polarização; e QN1803 (e) pré-polarização e (f) pós-polarização. Aumento: 50x.....	45
Figura 12	– Curvas de cronoamperometria dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803...	46
Figura 13	– Curvas de temperatura crítica de pite dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	48
Figura 14	– Diagrama de Nyquist dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	49

Figura 15 – Diagramas de Bode Módulo, à esquerda, e Bode Phase, à direita, dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	51
Figura 16 – Curvas de capacitância Mott-Schottky dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	52
Figura 17 – Gráfico com densidades de doadores (N_D) e de aceptores (N_A) dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	54
Figura 18 – Micrografias obtidas de um microscópio estereoscópio dos aços (a) UNS S30400, (b) UNS S31600 e (c) QN1803, após o ensaio de resistência à corrosão por pite. Aumento: 6x.....	58
Figura 19 – Gráficos de média de perda de massa do aço UNS S30400, UNS S31600 e QN1803, após o ensaio de resistência à corrosão por pite.....	59
Figura 20 – Micrografias ópticas após o ensaio de resistência à corrosão por pite, à esquerda, e análises das imagens pelo software ImageJ, à direita, dos aços (a) UNS S30400, (b) UNS S31600 e (c) QN1803. Aumento: 200x.....	60
Figura 21 – Gráficos de perfil de frequência e frequência acumulada de pites coletados dos aços (a) UNS S30400, (b) UNS S31600 e (c) QN1803, após o ensaio de resistência à corrosão por pite.....	61
Figura 22 – Gráficos de quantidade e tamanho médio de pite do aço UNS S30400, UNS S31600 e QN1803, após o ensaio de resistência à corrosão por pite.....	62
Figura 23 – Análise de MEV/EDS de pites e inclusões do aço (a) UNS S30400, (b) UNS S31600 e (c) QN1803, após o ensaio de resistência à corrosão por pite.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição química dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	31
Tabela 2	– Valores de cromo e níquel equivalentes dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	36
Tabela 3	– Valores nominais e medidos de dureza Rockwell B dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	40
Tabela 4	– Valores de monitoramento de potencial de circuito aberto dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	41
Tabela 5	– Valores de potencial e densidade de corrente obtidos da polarização potenciodinâmica linear anódica dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	43
Tabela 6	– Valores médios de temperatura crítica de pite dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	48
Tabela 7	– Valores médios de resistência à polarização dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	50
Tabela 8	– Limites de sobrepotencial que delimitam o intervalo de ocorrência do potencial de banda plana dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	53
Tabela 9	– Valores de equivalente de resistência à corrosão por pite (PREN) dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LPC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão
LACAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
LEM	Laboratório de Ensaios Mecânicos
UFC	Universidade Federal do Ceará
OCP	Potencial de Circuito Aberto
CPT	Temperatura Crítica de Pite
EIS	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica
MO	Microscopia Ótica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Corrosão	18
3.2	Aços inoxidáveis	18
3.3	Aços inoxidáveis austeníticos	20
3.3.1	<i>Aço inoxidável austenítico UNS S30400</i>	21
3.3.2	<i>Aço inoxidável austenítico UNS S31600</i>	22
3.3.3	<i>Aço inoxidável austenítico QN1803</i>	22
3.4	Corrosão em aços inoxidáveis	23
3.5	Ensaio eletroquímico	24
3.5.1	<i>Potencial de circuito aberto</i>	24
3.5.2	<i>Polarização potenciodinâmica linear</i>	25
3.5.3	<i>Cronoamperometria</i>	26
3.5.4	<i>Temperatura crítica de pite</i>	27
3.5.5	<i>Espectroscopia de impedância eletroquímica</i>	27
3.5.6	<i>Capacitância Mott-Schottky</i>	28
3.6	Resistência à corrosão por pite (ASTM G48-A)	31
4	MATERIAIS	32
5	METODOLOGIA	33
5.1	Caracterização mecânica e microestrutural	33
5.2	Ensaio eletroquímico	34
5.2.1	<i>Polarização potenciodinâmica linear</i>	35
5.2.2	<i>Cronoamperometria</i>	35
5.2.3	<i>Temperatura crítica de pite</i>	35
5.2.4	<i>Espectroscopia de impedância eletroquímica</i>	35
5.2.5	<i>Capacitância Mott-Schottky</i>	36
5.3	Resistência à corrosão por pite (ASTM G48-A)	36
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
6.1	Caracterização mecânica e microestrutural	37

6.2	Potencial de circuito aberto	41
6.3	Polarização potenciodinâmica linear	42
6.4	Cronoamperometria	47
6.5	Temperatura crítica de pite	48
6.6	Espectroscopia de impedância eletroquímica	49
6.7	Capacitância Mott-Schottky	52
6.8	Resistência à corrosão por pite (ASTM G48-A)	56
7	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um fenômeno espontâneo de degradação dos materiais, provocando um ataque eletroquímico na superfície, resultando em danos estruturais, potenciais acidentes e impactos financeiros para a sociedade. Estima-se que aproximadamente 5% da renda das nações industrializadas seja destinada à prevenção da corrosão e à manutenção ou substituição de produtos deteriorados por esse processo (Callister Jr; Rethwisch, 2020).

Os metais são materiais naturalmente suscetíveis a esse fenômeno, levando a sociedade a constantes pesquisas sobre medidas de proteção para prolongar a vida útil dessas estruturas e a desenvolver novas ligas capazes de substituir as convencionais, demonstrando maior eficiência na resistência à corrosão sem perda de qualidade operacional em outras propriedades.

Os aços carbono comuns e os de baixa liga são fortemente afetados pelo ataque corrosivo, exigindo medidas de proteção para favorecer sua utilização. Os aços inoxidáveis foram desenvolvidos para contornar esse problema, pois a adição de cromo em sua composição promove a formação de uma camada passiva protetora, evitando a exposição direta da superfície do material ao ambiente (Beddoes; Parr, 1999).

A alta resistência à corrosão é a principal vantagem desse material, mas suas propriedades de ductilidade, dureza e resistência mecânica também viabilizam sua utilização em diversos setores da indústria e construção civil. Além disso, podem ser aplicados em condições corrosivas agressivas, como em ambientes de alta salinidade, temperatura elevada ou criogênica, e meios ácidos ou alcalinos (Sheets, 2013).

Os aços inoxidáveis austeníticos são a classe mais popular de inoxidáveis, destacando-se pela resistência à corrosão, excelente ductilidade e propriedade de soldabilidade. Essas características são desenvolvidas principalmente devido ao teor de níquel na composição, que favorece a estabilização da fase austenita e retarda a cinética de transformação em fase ferrita (Héctor; Carbó, 2008).

Nos últimos anos, o níquel tem apresentado uma tendência de escassez e consequente aumento de custos, principalmente devido à ascensão das indústrias de aços inoxidáveis e de baterias recarregáveis de veículos elétricos (Mudd; Jowitt, 2022). A eliminação ou redução do uso desse recurso na produção de aços inoxidáveis proporciona uma economia substancial. Além disso, essa redução contribui para a proteção ambiental, uma vez que o níquel é responsável por um consumo considerável de energia durante o processo de fabricação desses materiais.

Outro problema associado ao uso desse elemento envolve riscos à saúde humana e animal, devido à capacidade de causar alergias e ao potencial carcinogênico (Lo; Shek; Lai, 2009; Zhao *et al.*, 2023). Portanto, a diminuição da utilização do níquel não só oferece vantagens econômicas e ambientais, mas também pode ajudar a mitigar impactos negativos à saúde.

Para atender a essa demanda, o aço inoxidável austenítico QN1803 foi desenvolvido com apenas 3% de níquel na composição, muito abaixo do teor nos aços convencionais dessa classe. Para manter o efeito de estabilização da austenita, foi necessário aumentar os teores de manganês e nitrogênio para 5% e 0,2%, respectivamente (Jiang *et al.*, 2020).

Esse material proporciona uma redução de custos de produção de aproximadamente 20% e apresenta excelente desempenho em termos de resistência mecânica e ductilidade, em comparação com aços pertencentes à mesma classe, tornando-se uma liga amplamente utilizada no mercado atualmente (Zhou *et al.*, 2020). No entanto, a literatura acadêmica ainda carece de informações sobre a propriedade de resistência à corrosão desse material. Portanto, este estudo realiza uma análise e caracterização do comportamento eletroquímico do aço QN1803 mediante exposição a ambientes com elevados teores de cloreto. Além disso, são conduzidos os mesmos testes nos aços UNS S30400 e UNS S31600, também inoxidáveis austeníticos, para comparar e avaliar o desempenho do novo material.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência à corrosão do aço inoxidável austenítico QN1803 exposto a ambientes com altos teores de íons cloreto, comparando os resultados com as ligas UNS S30400 e UNS S31600.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos QN1803, UNS S30400 e UNS S31600 em solução de $NaCl\ 2\ M$, por meio de técnicas eletroquímicas de potencial de circuito aberto (OCP), polarização potenciodinâmica linear, cronoamperometria, temperatura crítica de pite (CPT), espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e capacitância Mott-Schottky;
- Avaliar a propriedade de resistência à corrosão por pite das ligas estudadas, por meio da imersão em solução de $FeCl_3 \cdot 6H_2O\ 6\%$, de acordo com a norma ASTM G48-A, correlacionando o desempenho à exposição a ambientes marinhos;
- Avaliar a propriedade de dureza das ligas estudadas por meio da técnica Rockwell B;
- Caracterizar a microestrutura das ligas estudadas por meio de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica por varredura (MEV).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Corrosão

A corrosão é um fenômeno espontâneo que ocorre na superfície dos metais, baseado em reações químicas ou eletroquímicas de oxirredução, envolvendo a transferência de elétrons devido à diferença de potencial característica de um metal imerso em um eletrólito. No caso das reações eletroquímicas na interface metal/eletrólito, que ocorrem considerando um circuito fechado, elétrons são liberados pelo metal, correspondendo à reação de oxidação, e são transportados em direção a outra espécie química, onde ocorre a reação de redução (Gentil, 1996; Panossian, 1993).

Um relatório divulgado em 2016 pela *National Association of Corrosion Engineers (NACE International)* indica que as perdas econômicas mundiais atribuídas à corrosão são estimadas em 2,5 bilhões de dólares por ano, correspondendo a cerca de 3,4% do Produto Interno Bruto global de 2013. A entidade sugere, no referido relatório, que a implementação apropriada de métodos de controle e prevenção da corrosão pode resultar em uma redução de até 35% nos prejuízos causados pela corrosão (Kania, 2023; Koch *et al.*, 2016).

A corrosão é um processo destrutivo que, em geral, pode ser prejudicial e deve ser evitado. No entanto, a compreensão dos fundamentos possibilita a identificação dos mecanismos de corrosão e a elaboração de métodos de proteção para materiais metálicos em condições de serviço. Isso inclui o desenvolvimento de ligas mais resistentes capazes de suportar exposições prolongadas a ambientes corrosivos (Cramer *et al.*, 2003).

3.2 Aços inoxidáveis

O aço tem sido um dos principais materiais utilizados pela sociedade por várias décadas, alcançando um consumo anual superior a um bilhão de toneladas, principalmente devido à sua ampla variedade de microestruturas e propriedades (Bhadeshia; Honeycombe, 2017).

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro-carbono que contêm, em sua composição, no mínimo, cerca de 10,5% de cromo. Outros elementos de liga são frequentemente adicionados durante o processo de fabricação para melhorar suas propriedades, incluindo molibdênio, manganês, silício, entre outros (Sheets, 2013).

A presença do elemento cromo na composição melhora a resistência à corrosão do aço pelo fenômeno de passivação, que envolve a capacidade de formar uma fina camada autorregenerativa, homogênea, aderente, impermeável e insolúvel de óxido, que protege o metal da exposição direta a ambientes oxidantes (Modenesi, 2001).

Os aços inoxidáveis geralmente contêm um teor significativo de níquel, não apenas para contribuir com a resistência à corrosão, mas também para contrabalancear o efeito de formação da fase ferrita (α) devido à presença de cromo no aço. Isso ocorre pela capacidade de retenção da fase austenita (γ) à temperatura ambiente, retardando a cinética de transformação da fase γ em α (Bhadeshia; Honeycombe, 2017).

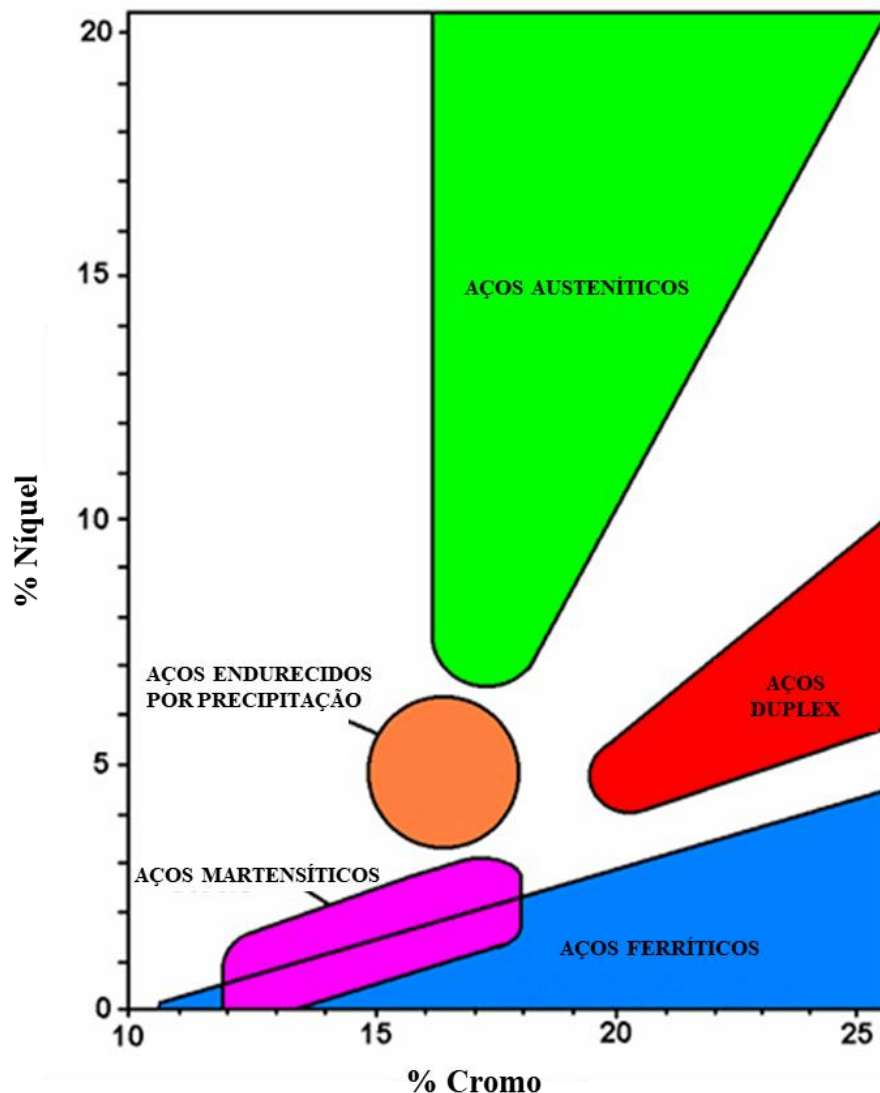
Comparado aos aços carbono convencionais, os aços inoxidáveis geralmente se destacam por sua maior ductilidade, resistência mecânica, dureza e resistência à corrosão. Devido a essas vantagens, os aços inoxidáveis podem ser aplicados em uma ampla variedade de áreas, particularmente na construção civil, onde possibilitam o desenvolvimento de estruturas com diversas formas e cores, além de contribuir para a sustentabilidade, tanto na fase de fabricação quanto na reciclagem (Baddoo, 2008; Sheets, 2013).

A norma ASTM A240 regula os aços inoxidáveis à base de Cr e $Cr-Ni$, estabelecendo requisitos para a composição química e algumas propriedades mecânicas (American Society for Testing and Materials, 2022). Informações mais detalhadas sobre esses materiais podem ser obtidas por meio de consulta a catálogos técnicos de fornecedores ou documentos científicos na literatura.

Embora apresentem algumas propriedades superiores, é essencial selecionar a classe de aço inoxidável mais adequada para a aplicação específica. A classificação desses aços pode ser feita com base nas microestruturas observadas em temperatura ambiente, as quais resultam da estabilização de fases na microestrutura, uma característica determinada pelos elementos de liga presentes em sua composição.

Por meio da Figura 1 é possível identificar as regiões correspondentes a cada classe de aço inoxidável com base na relação entre os teores de Cr e Ni em sua composição: aços austeníticos, aços ferríticos, aços martensíticos, aços duplex e aços endurecidos por precipitação (Sheets, 2013).

Figura 1 – Grupos de aços inoxidáveis classificados com base na relação entre percentuais de cromo e de níquel.



Fonte: Adaptado de Atlas Steels Grade Data Sheets, 2013.

3.3 Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são considerados a classe mais popular de aços inoxidáveis devido à sua versatilidade para aplicações em ambiente corrosivos. Essa versatilidade é resultado de sua elevada resistência à corrosão, que é promovida pelos altos teores de cromo e níquel presentes nesses materiais. Além disso, esses aços podem ser aplicados em uma ampla faixa de temperaturas, desde condições criogênicas até temperaturas elevadas, da ordem de 1.000°C (Aperam, 2015; Marshall, 1984-).

A microestrutura austenítica estável desses materiais confere-lhes propriedades como boa conformabilidade, soldabilidade, ductilidade, tenacidade e caráter não-magnético, adequadas para ambientes agressivos (Kaladhar; Subbaiah; Rao, 2012). O cromo e o níquel, seus principais elementos, variam de 15 a 26% e 5 a 37%, respectivamente. Teores mais altos de níquel são característicos da série 300, segundo o American Iron and Steel Institute. Elementos como molibdênio, que aumenta a resistência à corrosão por pites, e manganês e nitrogênio, que estabilizam a fase austenítica, também podem ser encontrados em sua composição (Padilha; Rios, 2002)

3.3.1 Aço inoxidável austenítico UNS S30400

O aço inoxidável austenítico UNS S30400, também conhecido como 304, destaca-se por sua combinação de propriedades mecânicas excelentes, que incluem resistência à corrosão, capacidade de suportar altas temperaturas, facilidade de fabricação e soldagem, além de boa ductilidade e resistência ao impacto (Dillon, 1995).

Essas características tornam o 304 o tipo mais comum de aço utilizado na construção civil, além de encontrar aplicação em diversos contextos, desde utensílios domésticos como pias e talheres, até equipamentos industriais da indústria da farmacêutica, vasos criogênicos e componentes aeroespaciais (Kumar *et al.*, 2022; Sanusi *et al.*, 2018).

3.3.2 Aço inoxidável austenítico UNS S31600

O aço inoxidável austenítico UNS S31600, também conhecido como 316, é frequentemente utilizado para a constituição de recipientes, tubulações e componentes industriais expostos a substâncias altamente corrosivas, como soluções salinas, ácidas ou alcalinas. A adição de molibdênio garante uma melhoria nas propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão em ambientes que contêm cloreto (Fernandes, 2010).

Uma das principais distinções do aço 316 em relação ao 304 reside na presença de molibdênio em sua composição. O *Mo* exerce um favorável na resistência à corrosão por pites dos aços inoxidáveis, embora ainda esteja sujeito a debate científico. Algumas teorias sugerem que essa melhoria está ligada à formação de molibdatos, que contribuem para a estabilidade do filme passivo, alterando a polaridade do filme e impedindo a penetração de íons cloreto. Outros argumentam que a melhoria na resistência à corrosão por pites é resultado da aprimorada repassivação, dificultando a formação e o crescimento dos pites (Pardo *et al.*, 2008).

3.3.3 Aço inoxidável austenítico QN1803

O aço inoxidável austenítico QN1803 possui baixo teor de níquel, cerca de 3%, compensado pelo aumento de manganês e nitrogênio para aproximadamente 5% e 0,2%, respectivamente. Esse ajuste visa estabilizar a fase austenítica, que seria prejudicada pela redução do níquel (Jiang *et al.*, 2020).

O nitrogênio, limitado em solubilidade, contribui para a estabilização da austenita e melhora a resistência à corrosão por pites e frestas em ambientes com cloreto. Esse efeito é associado à formação de íons NH_4^+ que inibem a oxidação e estabilizam o filme passivo na superfície, prevenindo a penetração de íons Cl^- . A produção de nitratos também reforça a resistência à corrosão por pites (Baba; Kodama; Katada, 2002).

Estudos revelam que o aumento do teor de Mn na composição dos aços inoxidáveis favorece a estabilização de austenita e solubilização de N na microestrutura. No entanto, prejudica significativamente a resistência à corrosão por pites, devido à formação de inclusões de sulfato de manganês (MnS), que atuam como locais propícios para a nucleação de pites (Pardo *et al.*, 2008).

Esse material foi desenvolvido como uma alternativa aos inoxidáveis austeníticos tradicionais, como o UNS S30400, que possuem teor de níquel superior a 8% e enfrentam desafios relacionados à escassez desse elemento e ao aumento dos custos para aquisição e utilização na produção (Jiang *et al.*, 2020).

Essa liga tem ganhado popularidade no mercado devido ao seu custo, que representa aproximadamente 80% do custo para produção do aço 304, e ao seu desempenho superior em resistência mecânica, ductilidade e resistência à corrosão em ambientes ácidos, em comparação com este mesmo aço (Cheng *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2020).

3.4 Corrosão em aços inoxidáveis

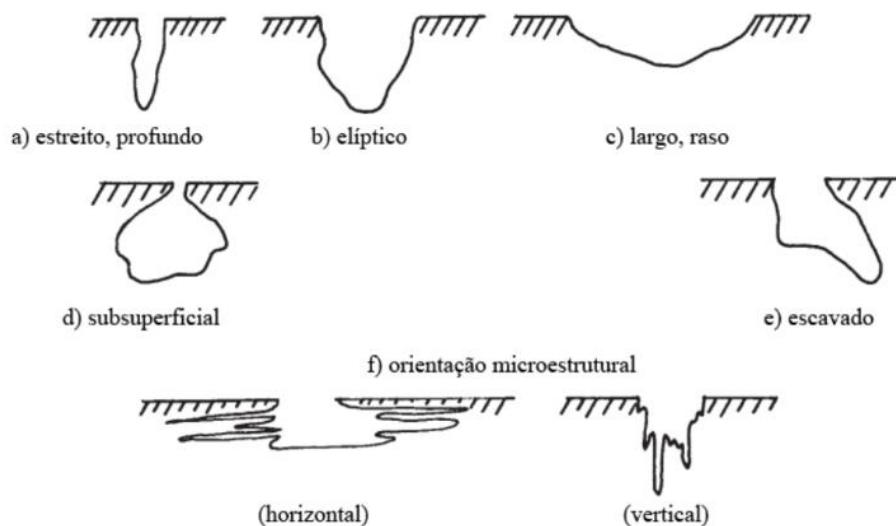
Apesar de serem chamados aços inoxidáveis, essas ligas ainda são susceptíveis à corrosão. Na superfície, apresentam diferentes estados eletroquímicos que influenciam diretamente a taxa de corrosão. No estado de passivação, a taxa de corrosão é próxima de zero, enquanto no estado ativo e transpassivo ocorre a corrosão uniforme (SCHWENK, 1964).

A corrosão localizada por pites é um dos principais problemas em aços inoxidáveis. Ela surge de um ataque eletroquímico de ânions corrosivos, formando orifícios na superfície. Quando a deterioração acelera e supera a repassivação do material, sua integridade estrutural é comprometida (Loto, 2018).

Essa forma de corrosão é frequentemente observada em ambientes aquosos contendo cloretos, sulfatos e outros compostos corrosivos. Em particular, os íons cloreto são considerados agressivos ao material devido ao seu pequeno tamanho, alta difusividade e forte natureza aniônica. Eles desempenham um papel fundamental na desestabilização e quebra da camada passiva, e essa influência está diretamente relacionada de forma logarítmica com a concentração desses íons (Dastgerdi *et al.*, 2019).

A Figura 2 ilustra possíveis formatos de pites na superfície dos metais, o que permite compreender a probabilidade de crescimento do defeito e modo preferencial de propagação da corrosão. Isso auxilia na avaliação do tipo de reparo necessário ou da possível substituição do metal (American Society for Testing and Materials, 2021).

Figura 2 – Variações de morfologia de corrosão localizada por pites observados em aços inoxidáveis.



Fonte: Queiroz, 2021.

3.5 Ensaios eletroquímicos

3.5.1 Potencial de circuito aberto

O potencial de circuito aberto (OCP) é uma técnica não-destrutiva para monitorar a atividade corrosiva, baseada na relação entre a reatividade do metal e a capacidade oxidativa da solução aquosa, resultando em um parâmetro eletroquímico. Este parâmetro permite avaliar a tendência termodinâmica à corrosão do metal. Durante a análise, o potencial é medido em relação a um eletrodo de referência estável, o que possibilita atribuir variações observadas à interface metal/eletrólito (Hemkemeier *et al.*, 2022; Jiménez *et al.*, 2009).

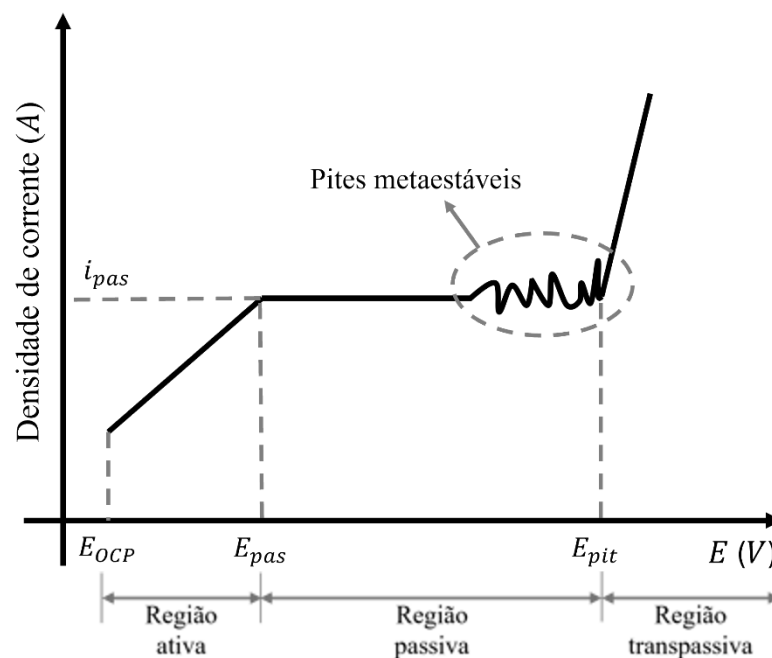
A medição do OCP, baseada em um tempo determinado de imersão do metal no eletrólito, é associada à tendência à estabilização dos valores de potencial em torno de um potencial estacionário. Tal estabilidade ocorre devido aos fenômenos ocorridos na interface metal/eletrólito (oxidação, passivação ou imunidade), os quais influenciam diretamente o potencial eletroquímico em cada instante (Jiménez *et al.*, 2009).

3.5.2 Polarização potenciodinâmica linear

A polarização é descrita como o deslocamento do potencial de equilíbrio do sistema, resultando na movimentação de elétrons em direção à superfície metálica, conhecida como polarização catódica, ou partindo da superfície metálica, chamada de polarização anódica. A magnitude desse deslocamento do potencial de equilíbrio é denominada sobrepotencial, sendo considerado anódico quando os valores são mais positivos que o potencial de equilíbrio e catódico quando são mais negativos (Jones, 1996).

A técnica de polarização linear é um método não-destrutivo eficiente para avaliar a taxa de corrosão por meio da análise da resistência à polarização, sendo a abordagem potenciodinâmica baseada na variação contínua do potencial de um eletrodo (Kouřil; Novák; Bojko, 2006). A Figura 3 ilustra o comportamento típico de uma curva de polarização linear para um material com propriedades passivantes.

Figura 3 – Ilustração de um comportamento padrão de curva de polarização potenciodinâmica linear anódica.



Fonte: Adaptado de Queiroz, 2021.

Na Figura 3, o E_{OCP} representa o potencial obtido no final do monitoramento de OCP; o E_{pas} e i_{pas} correspondem ao potencial e à densidade de corrente de passivação, respectivamente, que marcam a transição das regiões ativa e passiva; e o E_{pit} e i_{pit} , que separam as regiões passiva e transpassiva, correspondem, respectivamente, ao potencial e à densidade de corrente associada à quebra de filme passivo, onde ocorre um rápido aumento de densidade de corrente com o aumento de potencial.

Durante a nucleação dos pites a densidade de corrente segue o comportamento típico da transição passiva-transpassiva. Contudo, na região marcada como "pites metaestáveis" na Figura 3, ocorre uma propagação metaestável. Isso se caracteriza por um gradual aumento na densidade de corrente devido à rápida dissolução anódica localizada, seguido por uma diminuição da densidade de corrente, indicando o processo de repassivação da camada de óxido. Este fenômeno é comum em aços inoxidáveis e persiste até alcançar a propagação estável, característica da condição observada no potencial de pite.

3.5.3 Cronoamperometria

A cronoamperometria é uma técnica utilizada para analisar a variação da densidade de corrente ao longo do tempo em sistemas eletroquímicos. Essa técnica envolve o monitoramento contínuo da corrente ou densidade de corrente em um sistema quando um potencial específico é aplicado (Von Wandruszka; Orchard; Greeff, 1985).

A densidade de corrente medida durante os ensaios de cronoamperometria, representada no diagrama conhecido como transiente de corrente, é denominada corrente faradáica. Essa corrente segue a lei de Faraday e está diretamente relacionada às mudanças no estado de oxidação das espécies eletroativas (Pereira, 2019).

A cronoamperometria é frequentemente empregada no estudo dos processos que ocorrem na interface metal-solução. A partir da análise da curva de densidade de corrente em função do tempo, é possível obter informações sobre fenômenos como passivação e corrosão localizada, relacionando o fluxo de corrente que passa pelo eletrodo de trabalho com o gradiente de concentração das espécies eletroativas na superfície do eletrodo (Ferreira; Avaca, 2008).

3.5.4 Temperatura crítica de pite

A Temperatura Crítica de Pite (CPT) é uma técnica empregada para avaliar a resistência à corrosão por pite em aços inoxidáveis e ligas similares. Essa técnica pode ser adaptada para avaliar a resistência à corrosão de aços inoxidáveis e outras ligas relacionadas que tenham um CPT fora da faixa de medição padrão do teste, sendo necessário determinar o potencial de teste e a solução apropriados (American Society for Testing and Materials, 2018).

Para investigar como os critérios de formação de pite influenciam nos resultados, o CPT foi definido como a temperatura na qual a densidade de corrente atinge os valores críticos de $100 \mu A cm^{-2}$, frequentemente utilizados na literatura para definir o potencial de pite. Esse parâmetro foi estabelecido com base na correlação entre as condições de iniciação de pite, determinadas por varreduras de polarização anódica controladas potenciostaticamente realizadas em diversas temperaturas e meios oxidantes à base de cloreto (Brigham; Tozer, 1974; Pardo *et al.*, 2007).

3.5.5 Espectroscopia de impedância eletroquímica

A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) é uma técnica não-destrutiva fundamental para avaliar sistemas eletroquímicos, analisando a dinâmica das cargas na interface metal-solução. Ela oferece informações sobre a resistência à polarização dos materiais, propriedade diretamente relacionada à resistência à corrosão (Hiromoto, 2019; Ribeiro; Abrantes, 2016).

Operando no domínio da frequência, a EIS interpreta o parâmetro de impedância como a resistência de um circuito composto por resistores, capacitores e indutores, sujeito a uma tensão alternada, e a corrente resultante é calculada conforme a lei de Ohm. A técnica fornece informações sobre a cinética do processo corrosivo, o mecanismo de controle eletroquímico, filmes superficiais e fenômenos de transferência (Montemor; Simões; Ferreira, 2003).

A interpretação dos dados da EIS pode ser feita através da representação gráfica de Bode ou de Nyquist. Os gráficos de Bode Módulo e Bode Phase relacionam o logaritmo da frequência ($\log f$), em Hertz, com o logaritmo do módulo da impedância ($\log|Z|$), em Ohms, e o ângulo de fase (ϕ), em graus, respectivamente. O gráfico de Nyquist mostra a relação entre uma parte real (Z') e uma parte imaginária (Z''), resultando em um vetor de comprimento $|Z|$ e um ângulo de fase em relação ao eixo horizontal, representado pela parte real (Poursae, 2023; RIBEIRO; SOUZA; ABRANTES, 2015).

Embora ambos os gráficos sejam úteis para análise da EIS, cada um possui suas vantagens específicas. Geralmente, o gráfico de Bode é preferido quando a dispersão de dados no gráfico de Nyquist dificulta uma análise adequada do semicírculo, proporcionando uma compreensão mais clara do comportamento do sistema em relação à frequência (Poursaee, 2023). A partir do gráfico de Bode Módulo é possível determinar a resistência à polarização do material, em faixas de baixa frequência, e resistência da solução, em altas frequências. Já o Bode Fase possibilita determinar a proximidade do material a um comportamento capacitivo, medindo o ângulo de fase em relação a um capacitor ideal que alcança um ângulo de fase máximo de 90° (Li *et al.*, 2015; RIBEIRO; SOUZA; ABRANTES, 2015).

3.5.6 Capacitância Mott-Schottky

A passividade dos aços inoxidáveis é atribuída à formação de um filme de óxido na superfície do metal, que pode ter características semicondutoras. Os óxidos metálicos podem conter deficiência ou excesso de metal, resultando em vacâncias na estrutura do óxido. Esses defeitos, se eletricamente carregados, conferem uma carga positiva ou negativa ao óxido. Esses defeitos dão aos filmes de óxido características semicondutoras do tipo *n*, em caso de excesso de metal, ou do tipo *p*, em caso de vacância (Simoes *et al.*, 1990; Sunseri; Piazza; Di Quarto, 1990).

Quando um metal é imerso em um eletrólito, forma-se uma interface metal-solução, onde ocorre a formação de uma dupla camada elétrica (DCE) ou plano de Helmholtz, devido ao acúmulo de íons, apresentando uma capacitância correspondente. Enquanto isso, na superfície do metal revestido por um filme passivo semicondutor, há uma capacitância associada à criação de uma região de depleção e de acúmulo de transportadores de carga, denominada região de carga espacial (Hakiki *et al.*, 1995).

A DCE e a região de carga espacial se comportam como capacitores em série. Assim, a capacitância na interface metal-solução pode ser definida pela Equação 1, sendo *C* a capacitância total, *C_{CE}* e *C_{DCE}* são, respectivamente, as capacitâncias da região de carga espacial e da DCE (Hakiki *et al.*, 1995).

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{CE}} + \frac{1}{C_{DCE}} \quad (1)$$

A distribuição de carga associada ao potencial de banda plana (BP) representa a estabilidade energética do sistema, onde não há transferência de carga. Por outro lado, a região de depleção indica a ausência de elétrons em potenciais positivos em relação ao potencial de banda plana para semicondutores do tipo n e em potenciais negativos para os do tipo p . Já a região de acumulação representa o contrário da região de depleção, indicando um excesso de elétrons (Bott, 1998; Gerischer, 1989).

Com base nessa explicação, a resistência à corrosão dos filmes passivos pode ser diretamente ligada à capacidade de transferência de carga, que depende da presença de regiões de depleção ou acumulação. Quando há uma região de acumulação, o semicondutor se comporta de forma semelhante à ausência de um filme passivo superficial, enquanto na região de depleção, a transferência de elétrons é minimizada devido aos poucos portadores de carga disponíveis. Portanto, quanto melhor a condição do modo de depleção, melhor será a resistência à corrosão do material (Oguzie *et al.*, 2010).

A técnica Mott-Schottky é baseada na correlação entre o potencial aplicado e as medidas de capacitância interfacial, sendo importante para analisar as propriedades eletrônicas dos filmes de óxidos. Ela possibilita a determinação do potencial de BP e da concentração de dopantes, sejam eles de espécies doadoras de elétrons (tipo n) ou receptoras (tipo p) (Hakiki *et al.*, 1995). A Equação 2 é elaborada pela expressão da Equação 1 sob o modelo de Mott-Schottky.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{C_{CE}^2} + \frac{1}{C_{DCE}^2} + \frac{2}{C_{CE}C_{DCE}} \quad (2)$$

Considerando que a capacitância na DCE é consideravelmente superior à capacitância da região de carga espacial, os termos terceiro e quarto da Equação 2 podem ser descartados. Isso leva à aproximação da capacitância da interface metal-solução à capacitância da região de carga espacial. Dessa forma, obtêm-se a Equação 3 e 4, apropriadas para semicondutores do tipo n e do tipo p , respectivamente:

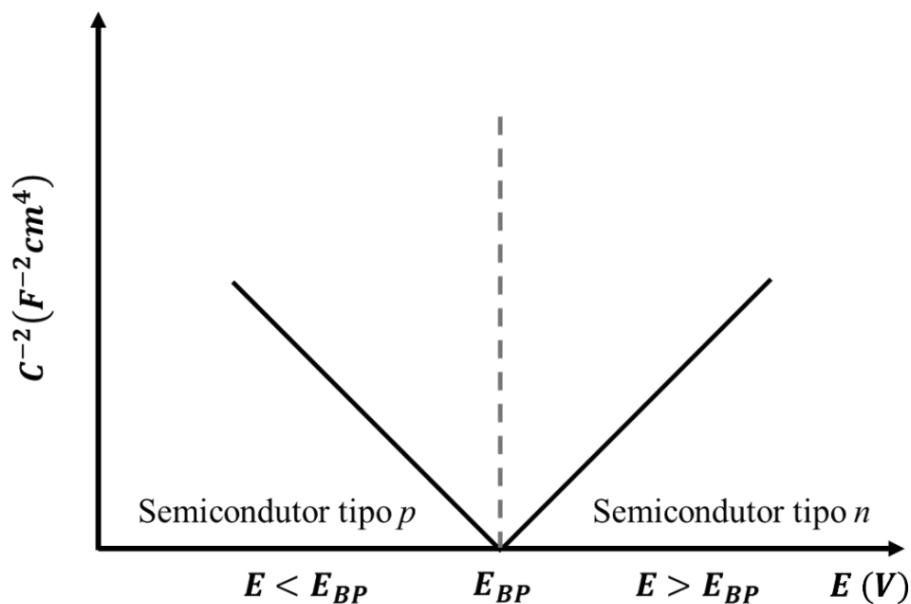
$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{\varepsilon\varepsilon_0qN_D} \left(E - E_{BP} - \frac{kT}{q} \right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{C^2} = -\frac{2}{\varepsilon\varepsilon_0qN_A} \left(E - E_{BP} - \frac{kT}{q} \right) \quad (4)$$

Em que ε é a constante dielétrica do filme passivo, geralmente adotada por 15,6 para aços inoxidáveis (Fernández-Domene *et al.*, 2014); ε_0 , a permissividade do vácuo ($8,85 \times 10^{-14} \text{ F cm}^{-1}$); q , a carga elementar ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$); E , o potencial aplicado; E_{BP} , o potencial de banda plana; k , a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$); T , a temperatura absoluta (298 K); e N_D e N_A , as densidades de doadores e aceptores, respectivamente.

Na Figura 4, é apresentado um gráfico esquemático da resposta de capacitância conforme modelado por Mott-Schottky, em que o inverso do quadrado da capacitância ($1/C^2$) é relacionado ao potencial aplicado (E). Nessa figura pode ser observado o comportamento da capacitância do material através das curvas, as quais podem ser descritas por uma inclinação linear positiva, indicativa do tipo n ; uma inclinação linear negativa, indicativa do tipo p ; ou pela região de inversão da propriedade semicondutora, que se refere à região de BP (Terada, 2008).

Figura 4 – Gráfico esquemático da resposta geral de capacitância dos aços inoxidáveis conforme modelo Mott-Schottky.



Fonte: Adaptado de Terada, 2008.

3.6 Resistência à corrosão por pite (ASTM G48-A)

A norma ASTM G48 descreve procedimentos para avaliar a resistência à corrosão por pites e frestas em aços inoxidáveis e ligas em ambientes com presença de cloreto. O

desempenho em soluções de cloreto férrico está correlacionado com o comportamento em ambientes reais, como água do mar à temperatura ambiente e meios fortemente oxidantes, de baixo pH e contendo cloreto (American Society for Testing and Materials, 2020).

O Método A, projetado especialmente para causar a corrosão localizada do aço inoxidável 304, é utilizado para avaliar a resistência relativa desses materiais à corrosão por pites. Este teste permite analisar os efeitos de aditivos de liga, tratamentos térmicos e acabamentos superficiais na resistência à corrosão por pite e por frestas, permitindo classificar as ligas de acordo com sua resistência em condições específicas (Bhandari *et al.*, 2017).

4 MATERIAIS

Neste estudo, foram utilizados os aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803. Os materiais foram recebidos na forma de placas e, posteriormente, cortados em corpos de prova de tamanho adequado para análises subsequentes, utilizando uma cortadora metalográfica do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC).

Os corpos de prova foram padronizados com dimensões aproximadas de 10 *mm* x 10 *mm* para os testes eletroquímicos. As espessuras dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803 foram, respectivamente, 13 *mm*, 11 *mm* e 2 *mm*. É importante destacar que não houve qualquer alteração na espessura original dos materiais durante o trabalho, a fim de preservar suas características microestruturais.

A composição química das ligas utilizadas foi apresentada na Tabela 1, com medições realizadas pelo Espectrômetro de Emissão Óptica do Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará. Devido a fatores operacionais do equipamento, não foi possível realizar a medição do aço QN1803 por esse método. Os dados apresentados para o aço QN1803 foram fornecidos pelo certificado de qualidade emitido pelo fornecedor e confirmados por um espectrômetro portátil para metais do LPC.

Tabela 1 – Composição química dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.

Aços	%C	%S	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%N	%Fe
UNS S30400	0,07	0,001	0,98	17,36	8,68	0,12	0,11	–	Bal.
UNS S31600	0,07	0,007	1,42	16,00	11,66	2,15	0,05	–	Bal.
QN1803	0,08	0,001	5,55	18,10	3,38	0,10	1,06	0,23	Bal.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

5 METODOLOGIA

5.1 Caracterização mecânica e microestrutural

Para realizar a caracterização microestrutural dos materiais, as amostras, com aproximadamente 1 cm^2 de área superficial, foram embutidas a quente em baquelite. Em seguida, essas amostras foram submetidas a um processo de lixamento com lixas d'água de granulometrias 220, 320, 400, 600 e 1200, seguido de polimento utilizando panos de polimento e pastas de diamante com granulometrias de $1\text{ }\mu\text{m}$ e $3\text{ }\mu\text{m}$.

Para observar a estrutura cristalina dos aços inoxidáveis austeníticos, foi realizado um ataque eletrolítico com reagente ácido oxálico 10%, preparado dissolvendo 10 g de ácido oxálico em 100 ml de água destilada. Esse método foi indicado para revelar os grãos austeníticos na estrutura dos materiais (Small; Englehart; Christman, 2008). O processo de ataque seguiu as diretrizes da norma ASTM E407 de 2015, que estabelece os critérios para a prática de ataque metalográfico em metais e ligas, aplicando uma tensão fixa de 3 V e imersão de cada metal por 75 segundos. Por fim, as amostras foram examinadas e micrografadas por meio de um microscópio óptico de platina invertida (American Society for Testing and Materials, 2015).

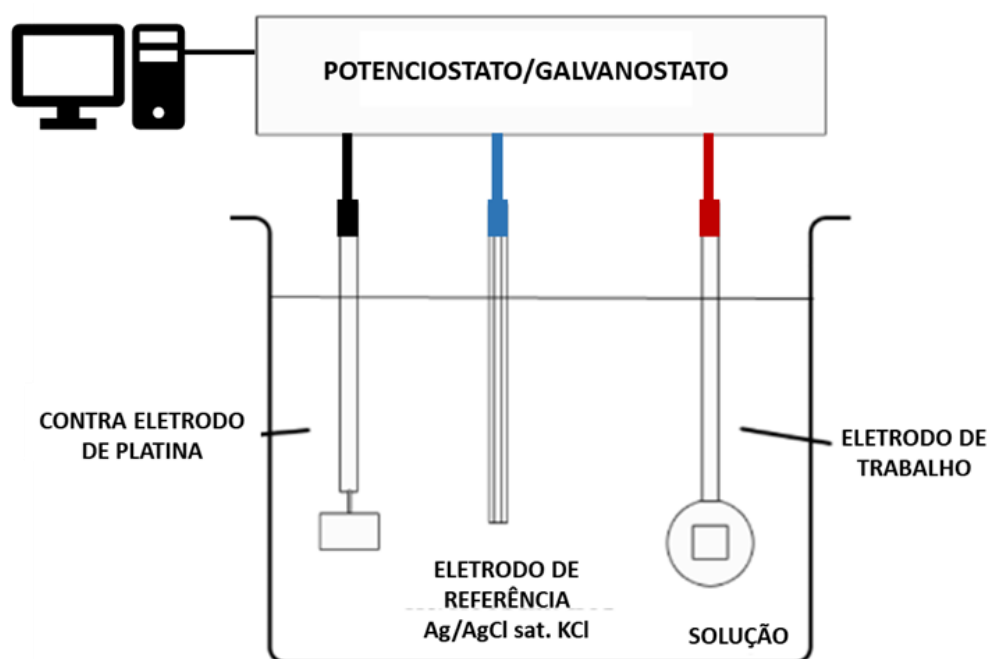
A dureza dos materiais foi avaliada por meio da medição da dureza Rockwell B, conforme a norma ABNT ISO 6508-1, realizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) da Universidade Federal do Ceará. Esse método consistiu na medição da profundidade de indentação causada por um indentador. Quanto maior a profundidade de indentação sob uma determinada força de ensaio, menor foi considerada a dureza do material, indicando que ele era mais macio.

Inicialmente, o indentador foi pressionado contra a amostra com uma pré-carga até atingir a profundidade de indentação inicial, estabelecendo um plano de referência para as próximas medições. Em seguida, uma força de ensaio adicional foi aplicada por um período determinado pela norma, fazendo com que o indentador penetrasse na amostra até a profundidade máxima de penetração. Após a retirada da força adicional de ensaio, o indentador retornou à sua posição inicial, compensando a parte elástica da profundidade de indentação. A partir dessa profundidade, a dureza Rockwell (HR) foi calculada conforme uma fórmula definida na norma ISO 6508, levando em consideração a escala Rockwell aplicada (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

5.2 Ensaios eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em triplicata no Laboratório de Pesquisa e Caracterização (LPC) para garantir a consistência dos resultados. Os testes foram conduzidos em temperatura ambiente, exceto no ensaio de CPT, utilizando uma solução de $\text{NaCl } 2 \text{ M}$ e uma célula eletroquímica de três eletrodos. O eletrodo de trabalho era composto pelas amostras dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803, o contra eletrodo era de platina, com área maior que a área exposta do eletrodo de trabalho, e o eletrodo de referência era Ag/AgCl sat. KCl . Essa célula foi conectada a um potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT30 (Metrohm), operado pelo software Nova 2.1. O sistema completo está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Esquema ilustrativo da montagem da célula eletroquímica utilizada nos ensaios eletroquímicos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

As amostras, utilizadas como eletrodos de trabalho, foram embutidas a frio por meio da polimerização de uma resina adicionada de um catalisador. Em seguida, cada amostra embutida foi lixada utilizando uma série de lixas d'água com diferentes granulometrias: 220, 320, 400, 600 e 1200. Após esse processo de preparação, as amostras estavam prontas para serem utilizadas nos ensaios eletroquímicos.

5.2.1 Polarização potenciodinâmica linear

A polarização potenciodinâmica linear foi realizada após uma hora de monitoramento do OCP em temperatura ambiente. Durante o ensaio, foi aplicada uma varredura contínua e ascendente de potencial a uma taxa de $0,16 \text{ mV/s}$, começando no potencial de OCP e indo até $0,8 \text{ V}$ em relação ao OCP, com um critério de parada estabelecido para quando a corrente atingisse 1 mA .

5.2.2 Cronoamperometria

As medidas de cronoamperometria também foram conduzidas após uma hora de monitoramento do OCP em temperatura ambiente. Para esse ensaio, foi aplicado um sobrepotencial constante de $0,25 \text{ V}$ em relação ao E_{OCP} de cada material, identificado nas curvas de polarização dentro de suas respectivas regiões passivas. O fluxo de corrente foi monitorado por um período de 600 segundos.

5.2.3 Temperatura crítica de pite

A configuração do ensaio de CPT seguiu o padrão dos outros testes eletroquímicos, mas utilizou uma célula encamisada com sensor para medição de temperatura. Antes do teste, o OCP foi monitorado e estabilizado por 600 segundos a uma temperatura inicial de 5° C . Em seguida, foi aplicado um sobrepotencial constante de $0,35 \text{ V}$ em relação ao E_{OCP} de cada material, por 60 segundos. Após isso, o aquecimento do banho termostático foi iniciado a uma taxa de $0,16^\circ \text{ C/min}$, mantendo a condição de sobrepotencial. O teste foi interrompido automaticamente caso a corrente atingisse $300 \mu\text{A}$.

5.2.4 Espectroscopia de impedância eletroquímica

Os ensaios de EIS foram realizados no potencial de circuito aberto, após uma hora de monitoramento e estabilização. O intervalo de frequência utilizado foi de $0,006 \text{ Hz}$ a 100 kHz , com uma taxa de varredura de 7 pontos por década e amplitude de $0,01 \text{ V}$.

5.2.3 Capacitância Mott-Schottky

Os ensaios de Mott-Schottky foram realizados após uma hora de monitoramento e estabilização do potencial de circuito aberto (OCP). Foi utilizada uma perturbação senoidal de 25 mV com frequência fixa de 1 kHz , em uma faixa de sobrepotencial de -1 V a $0,5\text{ V}$ em relação ao E_{OCP} de cada material, conforme identificado nas curvas de polarização, com variação de 25 mV .

5.3 Resistência à corrosão por pite (ASTM G48-A)

A avaliação da resistência à corrosão por pite, conforme a norma ASTM G48-A, ocorreu em solução de cloreto férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 6%) a uma temperatura de $22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, durante um período de 72 horas. Antes da imersão, as amostras foram lixadas com lixa d'água de granulometria 120, e suas áreas de exposição e pesos iniciais foram medidos em uma balança de precisão. Após a remoção, as amostras foram lavadas com água destilada, álcool isopropílico e secas por jato de ar quente, seguidas de nova pesagem. A taxa de corrosão das amostras foi calculada pela perda de massa dividida pela área superficial (Pardo *et al.*, 2007).

As amostras foram examinadas por microscopia em baixa ampliação (6x) em um microscópio estereoscópio do Laboratório de Pesquisa em Corrosão para observar o impacto geral da imersão dos materiais na solução utilizada. Além disso, as amostras foram analisadas em microscópio óptico com ampliação média (200x), permitindo a identificação dos pites e a contabilização para calcular a densidade, excluindo aqueles observados nas bordas, a menos que fossem relevantes (American Society for Testing and Materials, 2020). A análise foi realizada utilizando a ferramenta de análise de partículas do software ImageJ, com ajuste em escala de cinza das micrografias e contabilização de regiões pretas, associadas a defeitos na superfície, como pites.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização mecânica e microestrutural

O diagrama de Schaeffler-Delong possibilitou prever a microestrutura dos aços inoxidáveis, mostrando a estrutura predominante no material com base nos dados de cromo equivalente (Cr_{eq}), que indica a capacidade de promover a formação de ferrita, e níquel equivalente (Ni_{eq}), referente à capacidade de formação de austenita (Varbai *et al.*, 2022). Esses valores de Cr_{eq} e Ni_{eq} foram calculados por meio das Equações 5 e 6, com $[M]$ representando o percentual de composição de um elemento genérico M (Jiang *et al.*, 2020).

$$\%Cr_{eq} = [Cr] + 1,5[Mo] + 1,5[Si] + 1,75[Nb] + 1,5[Ti] + 5,5[Al] + 0,75[W] \quad (5)$$

$$\%Ni_{eq} = [Ni] + [Co] + 30([C] + [N]) + 0,5[Mn] + 0,3[Cu] \quad (6)$$

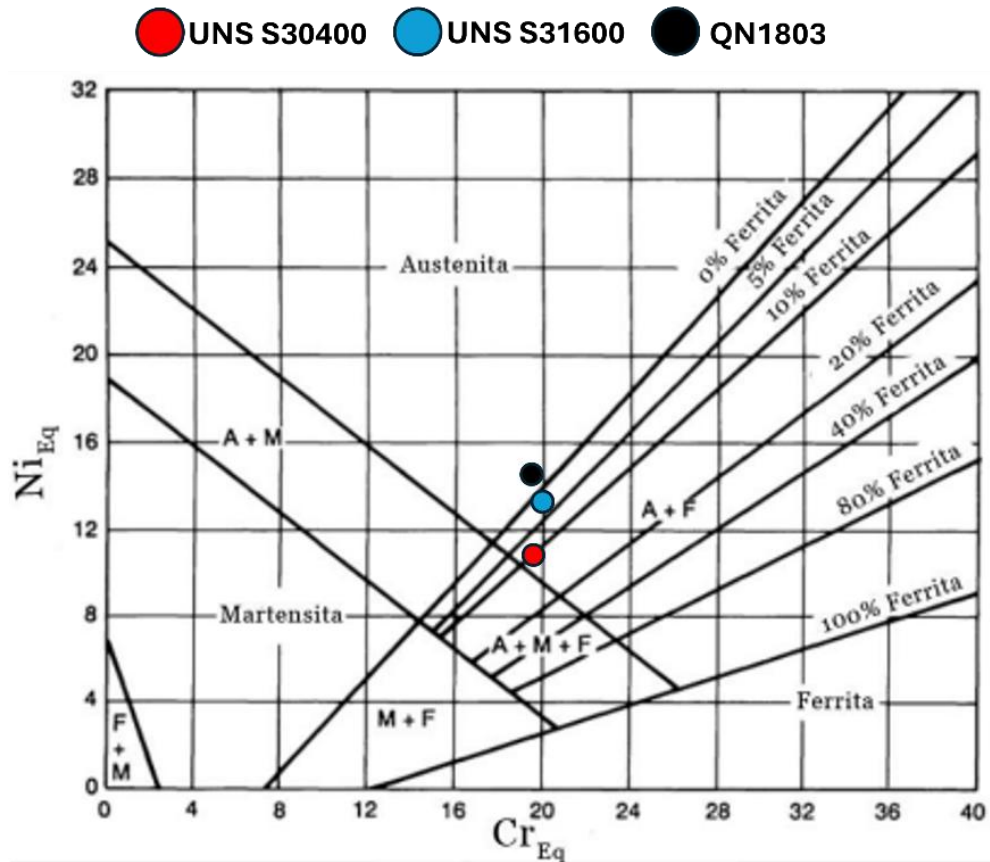
Os valores calculados de Cr_{eq} e Ni_{eq} para as ligas estudadas estão na Tabela 2. O aço QN1803 apresentou um valor de cromo equivalente semelhante ao do aço UNS S30400, próximo a 18%, e um valor de níquel equivalente semelhante ao do aço UNS S31600, próximo a 15%. Esses resultados foram indicados no diagrama Schaeffler-Delong, conforme mostrado na Figura 6. As coordenadas para o aço QN1803 indicaram uma tendência para formar uma microestrutura austenítica monofásica, enquanto os aços 304 e 316 mostraram uma tendência para formar uma microestrutura austenítica com aproximadamente 5% e 10% de ferrita, respectivamente.

Tabela 2 – Valores de cromo e níquel equivalentes dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.

Aços	$\%Cr_{eq}$	$\%Ni_{eq}$
UNS S30400	18,2	11,3
UNS S31600	20,0	14,5
QN1803	18,6	15,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 6 – Diagrama de Schaeffler-Delong com indicação da microestrutura predominante dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.



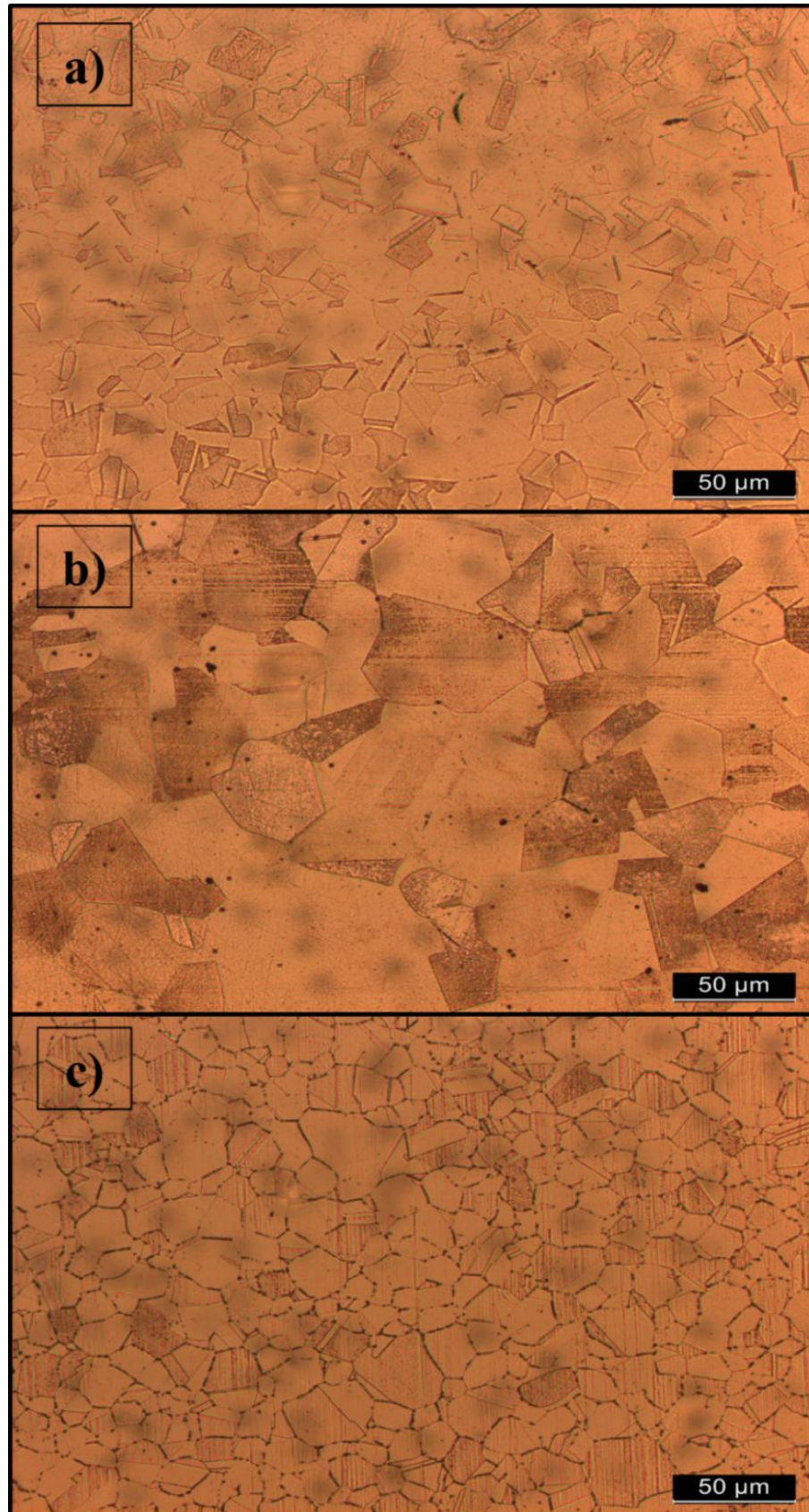
Fonte: Adaptado de Queiroz, 2021.

A Figura 7 apresentou as micrografias dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803 após a preparação metalográfica e o ataque eletrolítico para revelar a microestrutura. O reagente atacou preferencialmente a região de contorno de grão, proporcionando contraste adequado para a observação dos grãos.

As micrografias seguiram o padrão encontrado na literatura (Cheng *et al.*, 2021; Javidi; Haghshenas; Shariat, 2020). As microestruturas observadas refletiram o que era esperado conforme o diagrama de Schaeffler-Delong, com uma predominância praticamente integral de fase austenítica. Os grãos observados na microestrutura do aço QN1803 eram mais refinados do que os do aço 304, embora apresentassem formatos semelhantes, enquanto o aço 316 exibiu grãos maiores e menos refinados.

A microestrutura do aço QN1803 destacou-se pela presença de contornos de grão com tonalidade mais escura em comparação com os outros aços. Essa característica estava associada ao excesso de precipitação de carbonetos e nitretos nos contornos, indicando uma sensitização da microestrutura.

Figura 7 – Micrografias ópticas dos aços (a) UNS S30400, (b) UNS S31600 e (c) QN1803. Reagente: ácido oxálico 10%. Aumento: 200x.

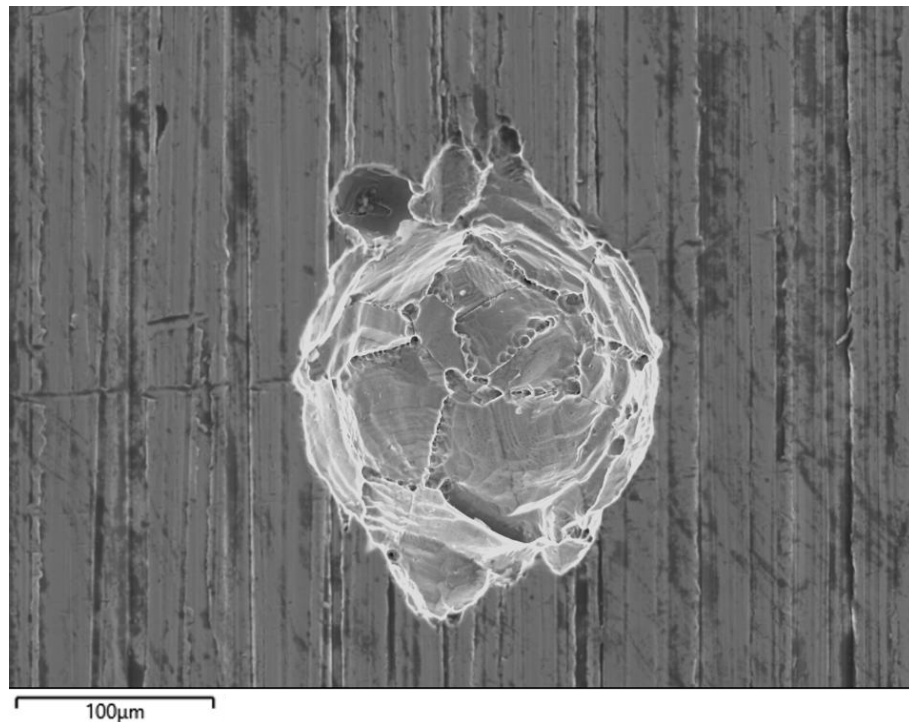


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O fenômeno de precipitação intergranular é fortemente dependente da estrutura atômica e das características dos contornos de grão. A microestrutura refinada observada no aço QN1803 pode ter contribuído para uma maior desorientação cristalográfica, influenciando diretamente na acumulação de precipitados nos contornos devido às distorções de alto ângulo (Cheng *et al.*, 2021; Kokawa; Shimada; Sato, 2000).

A Figura 8 apresenta uma micrografia do interior de um pite no aço QN1803, obtida por microscopia eletrônica de varredura após o ensaio de resistência à corrosão por pite. Os contornos de grão observados na imagem exibem características de ataque intergranular, confirmando a ocorrência do fenômeno de sensitização da microestrutura.

Figura 8 – Análise de MEV em interior de pite do aço QN1803 com ataque intergranular, característico de sensitização.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

De acordo com a literatura, os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 costumam ter uma dureza em torno de 80 *HRB* (Sedriks, 1996). Na Tabela 3, são apresentados os valores de dureza nominais e medidos dos aços analisados, obtidos pelo método Rockwell B. Os aços UNS S30400 e UNS S31600 mostraram valores medidos próximos aos seus nominais. Embora não haja dados na literatura sobre a dureza do aço QN1803, seu valor medido seguiu o padrão dos austeníticos da série 300, sendo ligeiramente superior aos demais, sugerindo uma melhoria em suas propriedades mecânicas em comparação com os outros.

Tabela 3 – Valores nominais e medidos de dureza Rockwell B dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.

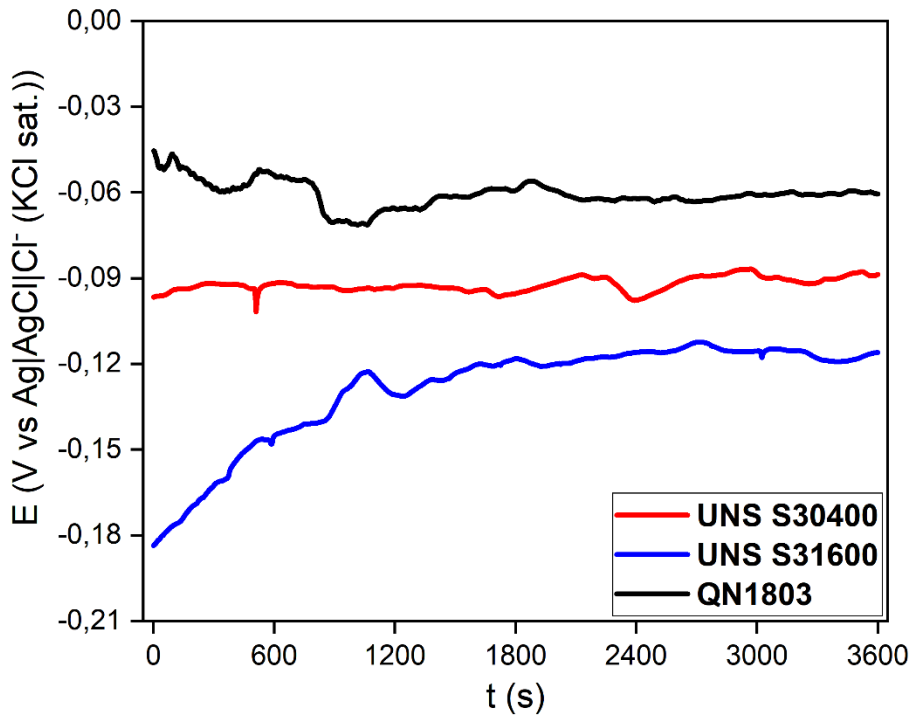
Aços	Nominais (HRB)	Medidos (HRB)
UNS S30400	80	77 ± 3
UNS S31600	79	75 ± 2
QN1803	—	81 ± 2

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

6.2 Potencial de circuito aberto

A Figura 9 apresentou os gráficos de OCP para os aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803 em solução de *NaCl* 2 M, monitorados por 3600 segundos. As curvas indicaram uma tendência de estabilização ao final do período, sugerindo que o tempo de monitoramento foi suficiente para alcançar o potencial estacionário dos materiais sob as condições de exposição.

Figura 9 – Curvas de monitoramento de potencial de circuito aberto dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

As triplicatas exibiram flutuações variáveis no potencial de circuito aberto (OCP), mas estabilizaram-se próximo aos potenciais estacionários (E_{OCP}) médios indicados na Tabela 4. Enquanto o aço UNS S31600 apresentou um aumento intenso do potencial durante parte do período de monitoramento, os aços QN1803 e UNS S30400 mantiveram-se praticamente constantes ao longo da medição. Isso sugeriu a ocorrência de um processo de formação e crescimento de uma camada passiva superficial até atingir uma espessura constante, o que foi indicado pela estabilização em um potencial estacionário (Sheik *et al.*, 2022).

Tabela 4 – Valores de monitoramento de potencial de circuito aberto dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.

Aços	UNS S30400	UNS S31600	QN1803
E_{OCP} (V vs Ag/AgCl sat. KCl)	-0,096 ± 0,003	-0,110 ± 0,004	-0,052 ± 0,022

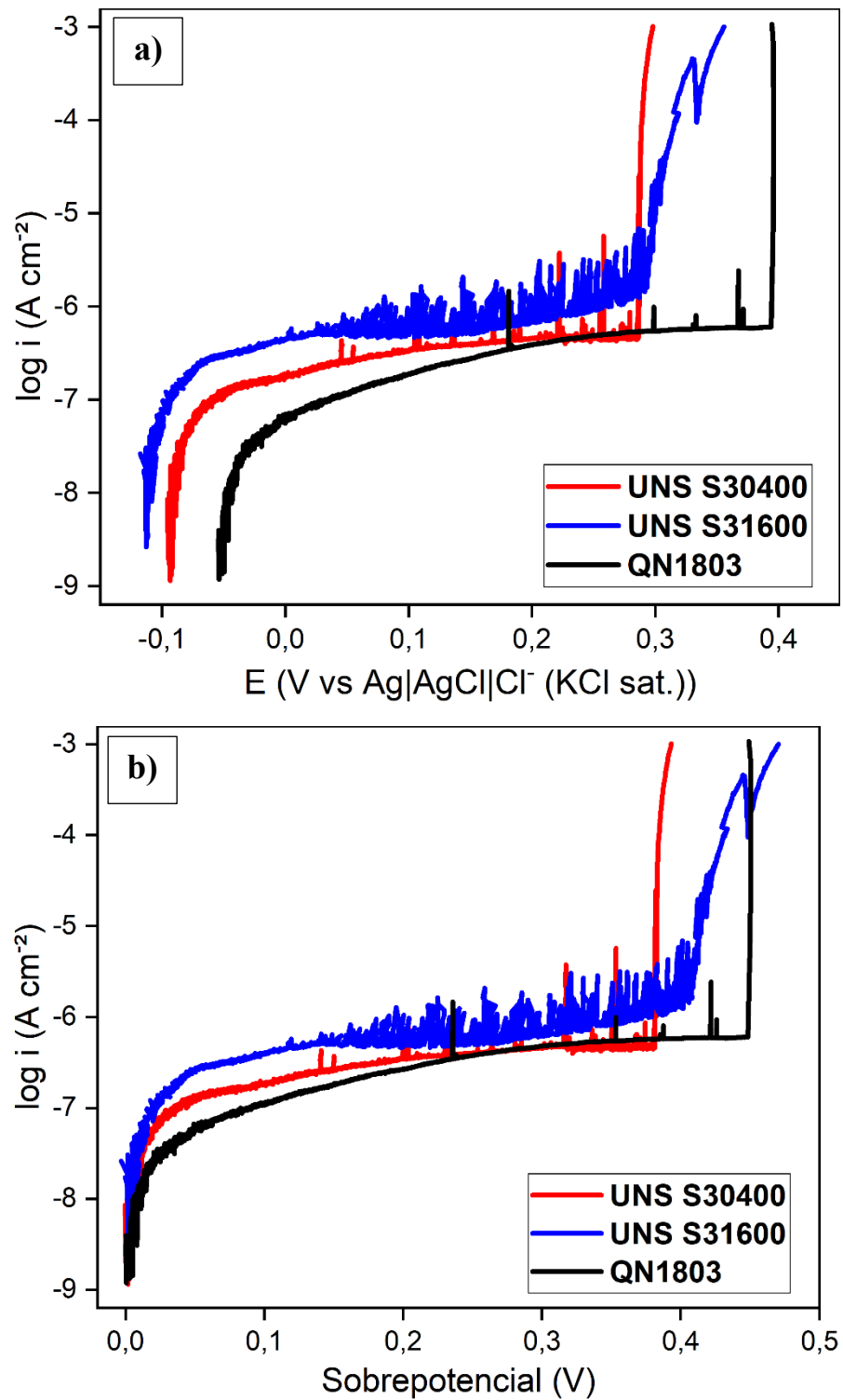
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A presença de altos teores de cloreto geralmente leva a potenciais mais negativos para aços inoxidáveis (Xie *et al.*, 2017). No entanto, a concentração de cloreto teve pouco efeito nos valores de E_{OCP} dos aços UNS S30400 e UNS S31600 em comparação com estudos anteriores realizados em condições de menor concentração (NaCl 3,5%). Por outro lado, observou-se um pequeno aumento no potencial do aço QN1803, em torno de 0,05 V, em comparação com estudos anteriores também conduzidos em solução de NaCl 3,5% (Jiang *et al.*, 2020; Otero *et al.*, 2004).

6.3 Polarização potenciodinâmica linear

A curva referente ao ramo catódico geralmente está associada ao processo de redução do oxigênio, enquanto as curvas na porção anódica correspondem à atividade corrosiva (Sheik *et al.*, 2022). Considerando o objetivo de analisar o comportamento dos materiais frente ao processo de corrosão, apenas o ramo anódico da polarização potenciodinâmica linear dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803 foi desenvolvido, partindo dos respectivos potenciais de OCP (E_{OCP}). As curvas de polarização estão representadas na Figura 10, com a escala horizontal apresentando valores de potencial e sobrepotencial.

Figura 10 – Curvas de polarização potenciodinâmica linear dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803 com eixos em (a) potencial e em (b) sobrepotencial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A análise das curvas mostradas na Figura 10a forneceu os valores de potencial de passivação (E_{pas}) e densidade de corrente de passivação (i_{pas}) por meio da derivada da região linear correspondente à área passiva, além do potencial de início de corrosão localizada (E_{pit}), identificado como o último potencial antes do aumento da densidade de corrente, conforme apresentado na Tabela 5. As curvas indicaram que os valores de densidade de corrente no E_{pit} foram praticamente iguais aos de i_{pas} , devido à formação de um filme passivo que controlou o aumento da corrente. A Tabela 5 também mostra a extensão da região passiva ($\Delta_{passiva}$), calculada pela diferença entre E_{pit} e E_{pas} .

Tabela 5 – Valores de potencial e densidade de corrente obtidos da polarização potenciodinâmica linear anódica dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.

Aços	UNS S30400	UNS S31600	QN1803
E_{pas} (V vs Ag/AgCl sat. KCl)	-0,008 ± 0,005	-0,017 ± 0,003	0,061 ± 0,031
i_{pas} ($\mu A/cm^2$)	0,373 ± 0,027	1,238 ± 0,261	0,402 ± 0,025
E_{pit} (V vs Ag/AgCl sat. KCl)	0,293 ± 0,014	0,305 ± 0,010	0,403 ± 0,006
$\Delta_{passiva}$ (V)	0,301	0,322	0,343

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na Figura 10a, observa-se uma transição da região ativa para a passiva nas curvas de polarização, embora o potencial de passivação ou pico anódico correspondente a essa mudança não tenha sido claramente definido. Os valores de E_{pas} listados na Tabela 5 representam a média dos potenciais em que a passivação começou nos materiais analisados. Por outro lado, a transição da fase passiva para a transpassiva foi evidenciada por um aumento rápido e significativo na densidade de corrente, conforme indicado pelos valores médios de E_{pit} , sugerindo a ruptura do filme passivo sem repassivação.

O aço QN1803 apresentou valores de potencial de passivação e de corrosão por pites superiores aos de outros aços, indicando que, em meios com alto teor de cloreto, respondeu a potenciais mais positivos tanto para a formação do filme de óxido quanto para o início da corrosão localizada. Os valores de $\Delta_{passiva}$ na Tabela 5, que correspondem à extensão da região passiva, definiram a amplitude de potencial que a camada passiva suportou. O aço QN1803 apresentou a maior extensão da região passiva, seguido pelo aço 316 e, por último, o aço 304, com a menor extensão.

Além disso, as curvas de polarização da Figura 10a mostraram que o aço QN1803 teve uma região passiva mais estável, com poucos ruídos de pites metaestáveis. O aço 304 apresentou propagação metaestável próxima ao E_{pit} , enquanto o 316 exibiu pites metaestáveis em quase toda a região passiva, dificultando a identificação do potencial de pite.

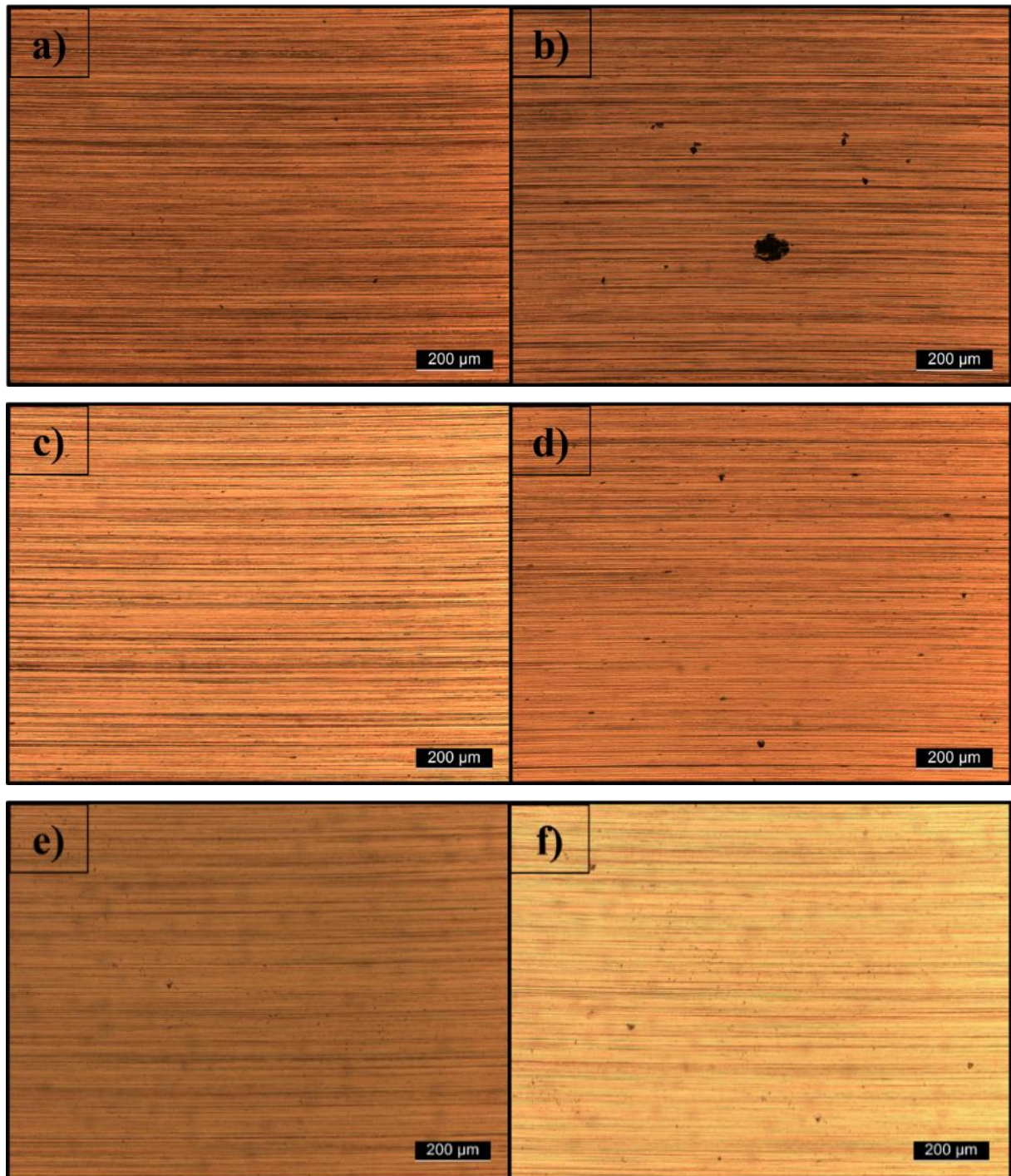
O aço QN1803 apresentou uma vantagem significativa devido à ampla região passiva e alta estabilidade, sugerindo a formação de um filme protetor resistente. Esse comportamento se deve ao maior teor de nitrogênio, que estabiliza o filme passivo, impede a penetração de íons cloreto e melhora sua capacidade de repassivação.

Esses fenômenos estão alinhados com teorias que indicam que, após a quebra localizada do filme passivo, o nitrogênio segregado na interface entre o metal e o filme passivo interage de maneira repulsiva com os íons cloreto, evitando danos adicionais. Essa interação favorece a rápida repassivação dos pites em aços com alto teor de nitrogênio. Além disso, o nitrogênio também contribui para a redução da acidificação, formando íons amônio e ajudando a manter a estabilidade do filme passivo. Estudos demonstram que, durante a corrosão, o nitrogênio reage com íons H^+ para formar íons NH_4^+ , neutralizando a queda de pH nos pites e melhorando a repassivação do filme (Grabke, 1996; Olefjord; Wegrelius, 1996).

Devido ao deslocamento das curvas de polarização no eixo de potencial, observado na Figura 10a, utilizou-se a Figura 10b para comparar os aços com base no sobrepotencial e determinar os potenciais na região passiva. Esses valores serviram de referência nos ensaios de cronoamperometria, temperatura crítica de pite e capacitância Mott-Schottky. Apesar de potenciais numericamente distintos, essa abordagem garantiu uma comparação mais precisa, assegurando condições equivalentes de afastamento dos potenciais estacionários.

A Figura 11 apresenta as micrografias ópticas dos aços antes e após o ensaio de polarização potenciodinâmica linear. Nas Figuras 11b, 11d e 11f, é evidente a corrosão localizada na superfície dos materiais devido à presença de pites, com quantidades semelhantes por área, mas com tamanhos variados para cada tipo de aço. Os pites no aço QN1803 foram praticamente imperceptíveis na ampliação utilizada, com pouca diferença em relação à condição pré-polarização. Por outro lado, os pites no aço 316 tinham tamanhos comparáveis aos do QN1803, mas eram mais visíveis. Os pites no aço 304 eram um pouco maiores e tinham formas mais definidas, tornando-os mais fáceis de detectar. Essa análise sugere que a nucleação de pites nos três aços foi semelhante, dada a densidade semelhante de pites, mas a propagação foi mais acentuada no aço 304, enquanto no QN1803 e no 316 foi menos intensa, com base na extensão e na facilidade de identificação dos pites.

Figura 11 – Micrografias ópticas dos aços UNS S30400 (a) pré-polarização e (b) pós-polarização; UNS S31600 (c) pré-polarização e (d) pós-polarização; e QN1803 (e) pré-polarização e (f) pós-polarização. Aumento: 50x.

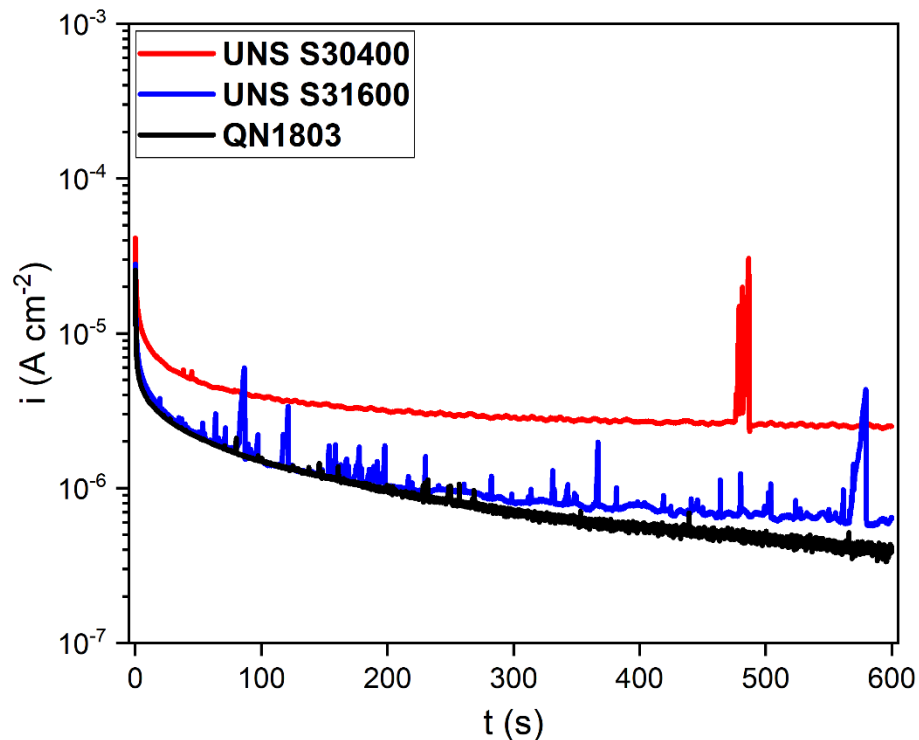


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

6.4 Cronoamperometria

A análise da densidade de corrente sob potencial fixo foi crucial para entender a cinética de crescimento e quebra do filme passivo (Miyata; Handa; Takazawa, 1990). A Figura 12 mostra as curvas de cronoamperometria dos aços estudados, realizadas a $0,25\text{ V}$, aproximadamente no centro da região passiva das curvas de polarização.

Figura 12 – Curvas de cronoamperometria dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Durante a análise, as curvas mostraram padrões semelhantes, com densidades de corrente inicialmente altas seguidas de rápida redução até estabilização. Essa diminuição reflete a formação e estabilização do filme passivo na superfície dos materiais (Xia *et al.*, 2013).

Ao final do monitoramento, o aço QN1803 apresentou a menor densidade de corrente estacionária, de $3,93 \times 10^{-7} \text{ A cm}^{-2}$, com um filme altamente estável e praticamente sem propagação metaestável de pites. O aço 316 teve a segunda menor densidade, de $6,44 \times 10^{-7} \text{ A cm}^{-2}$, mas com uma curva com alta intensidade de ruído, indicando a capacidade de repassivação do filme após a quebra. O aço 304 registrou a maior densidade de corrente, de $2,52 \times 10^{-6} \text{ A cm}^{-2}$, com um filme estável, porém com ocorrências esporádicas de ruídos na curva.

Pesquisas sugerem que altas concentrações de cloreto podem comprometer a resistência do filme passivo dos materiais, refletindo-se em altos valores de densidade de corrente estacionária. As curvas obtidas na cronoamperometria foram, portanto, utilizadas para comparar a resistência à corrosão com base nessas medidas de densidade de corrente (Gharib; Arab, 2020; Xia *et al.*, 2013). O aço QN1803 se destacou em comparação aos demais por sua menor densidade de corrente, indicando uma maior resistência à corrosão em condições de potencial fixo em meios com alto teor de cloreto.

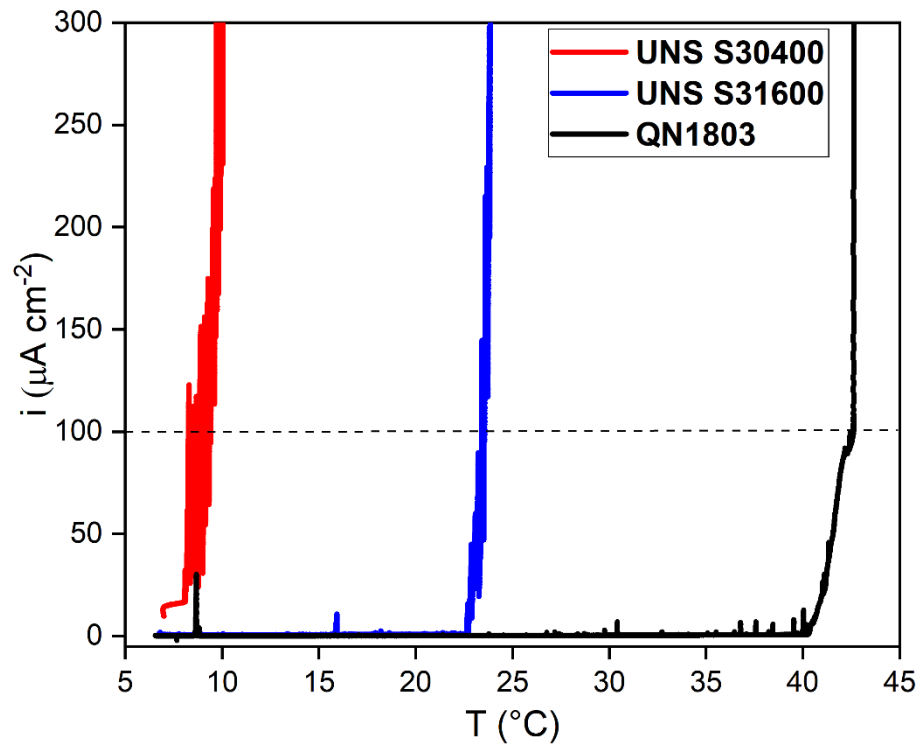
6.5 Temperatura crítica de pite

Na Figura 13, apresentaram-se os resultados das curvas obtidas pela técnica de temperatura crítica de pite, analisadas sob a condição de sobrepotencial máximo considerado no estudo ($0,35 V$). Essas curvas mostram a relação entre a densidade de corrente e a temperatura do sistema. Os valores médios de CPT para cada material estão apresentados na Tabela 6. Esses valores correspondem à temperatura em que a densidade de corrente atingiu $100 \mu A cm^{-2}$, indicada pela linha tracejada na Figura 13, representando o aumento contínuo e significativo da densidade de corrente associado à propagação estável de pites.

De acordo com a Figura 13, notou-se uma semelhança nos comportamentos das curvas entre os aços QN1803 e UNS S31600 ao longo do ensaio. Nas temperaturas iniciais de aquecimento, os valores de densidade de corrente permaneceram constantes e próximos a zero, sugerindo a presença de uma camada passiva, com alguns ruídos associados à propagação metaestável de pites. A Tabela 6 corrobora essas observações, mostrando que o aço QN1803 apresentou valores médios de CPT significativamente superiores aos dos outros materiais, aproximadamente o dobro do UNS S31600 e cerca de cinco vezes o do UNS S30400.

No caso do aço UNS S30400, houve dificuldades no ensaio devido ao seu valor de CPT estar muito próximo à temperatura inicial de operação do banho termostático, o que impossibilitou a análise do comportamento da curva antes do aumento de densidade de corrente. A maior temperatura crítica de pite do aço QN1803, em comparação com os aços UNS S30400 e UNS S31600, pode ser atribuída a uma maior resistência do filme passivo em ambientes com alto teor de cloreto durante o processo de aquecimento (Wei *et al.*, 2008).

Figura 13 – Curvas de temperatura crítica de pite dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Tabela 6 – Valores médios de temperatura crítica de pite dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.

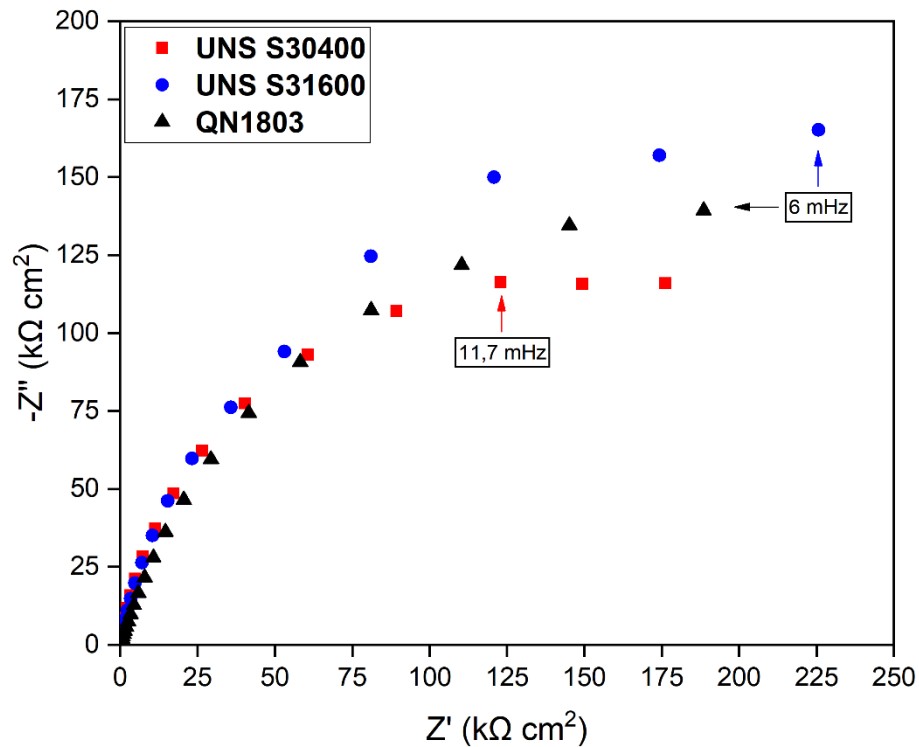
Aços	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
UNS S30400	8,35	0,71
UNS S31600	24,77	1,59
QN1803	41,01	4,22

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

6.6 Espectroscopia de impedância eletroquímica

A Figura 14 apresenta o gráfico de Nyquist para cada um dos aços estudados, obtido a partir do ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica. Os três aços exibiram comportamentos semelhantes, com valores de impedância na mesma ordem de grandeza. O aço UNS S31600 registrou os maiores valores, seguido pelo QN1803 e, por último, pelo UNS S30400.

Figura 14 – Diagrama de Nyquist dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

As curvas revelaram um padrão característico para aços inoxidáveis, exibindo um único e amplo semicírculo de comportamento capacitivo, que não se fechou completamente na região de baixas frequências. Isso é evidenciado no gráfico, onde os arcos alcançaram seus picos de impedância nas frequências mais baixas analisadas (6 *mHz* para o UNS S31600 e o QN1803, e 11,7 *mHz* para o UNS S30400).

A presença do arco capacitivo foi associada aos processos de transferência de carga na interface metal-solução, estando relacionada aos fenômenos de capacitância na dupla camada elétrica. A propriedade de resistência à corrosão dos materiais esteve diretamente ligada ao tamanho desse semicírculo, determinado pela projeção da curva de Nyquist no eixo de impedância real (Z'). A resistência à polarização foi determinada pelo ponto em que a curva interceptou o eixo, indicando a resistência à transferência de carga na interface metal-solução (Chaves *et al.*, 2006; Mohd Yusuf *et al.*, 2018).

Assim, um aumento no diâmetro do semicírculo sugeriu um aumento na resistência à corrosão. Os valores de resistência à polarização apresentados na Tabela 7 corroboraram essa análise das curvas de Nyquist, indicando resultados semelhantes de resistência à corrosão para os três tipos de aço.

Tabela 7 – Valores médios de resistência à polarização dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.

Aços	Média ($\Omega \text{ cm}^2$)	Desvio Padrão ($\Omega \text{ cm}^2$)
UNS S30400	$3,46 \times 10^5$	$9,99 \times 10^4$
UNS S31600	$4,06 \times 10^5$	$2,90 \times 10^4$
QN1803	$4,30 \times 10^5$	$1,57 \times 10^5$

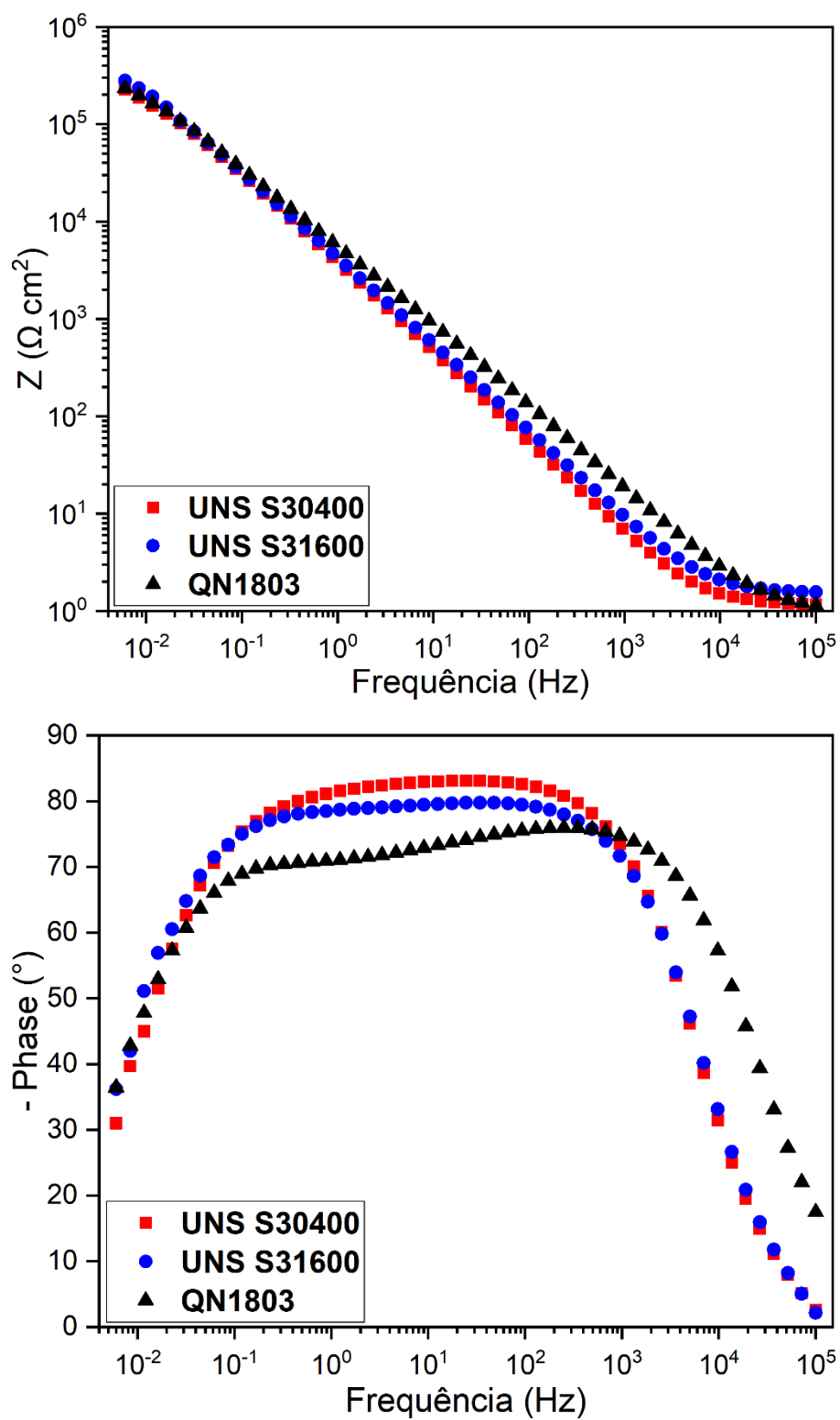
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Figura 15 apresenta os gráficos de Bode dos aços analisados no ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica. Os diagramas de Bode Módulo mostraram comportamentos semelhantes para todos os tipos de aço em diversas faixas de frequência, com destaque para os valores em baixas frequências, relacionados à resistência à polarização. As resistências à polarização foram $2,11 \times 10^5 \Omega \text{ cm}^2$ para UNS S30400, $2,80 \times 10^5 \Omega \text{ cm}^2$ para UNS S31600 e $2,34 \times 10^5 \Omega \text{ cm}^2$ para QN1803.

Os diagramas de Bode Phase dos aços UNS S30400 e UNS S31600 revelaram um único pico abrangendo a faixa de frequência média a baixa, com valores aproximados de -80° . Por outro lado, o aço QN1803 apresentou um único pico com uma extensão de faixa de frequência semelhante, mas com valores próximos a -70° . Esses ângulos de fase próximos a -90° indicaram um comportamento capacitivo dos materiais e sugeriram uma excelente capacidade de proteção do filme passivo.

Ao analisar os resultados de resistência à polarização, que refletem diretamente a resistência à corrosão, juntamente com o comportamento capacitivo do material e a qualidade do filme protetor, concluiu-se que o aço QN1803 apresentou uma resistência à corrosão comparável aos outros tipos e um filme passivo de alta qualidade em termos protetivos.

Figura 15 – Diagramas de Bode Módulo, acima, e Bode Phase, abaixo, dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.

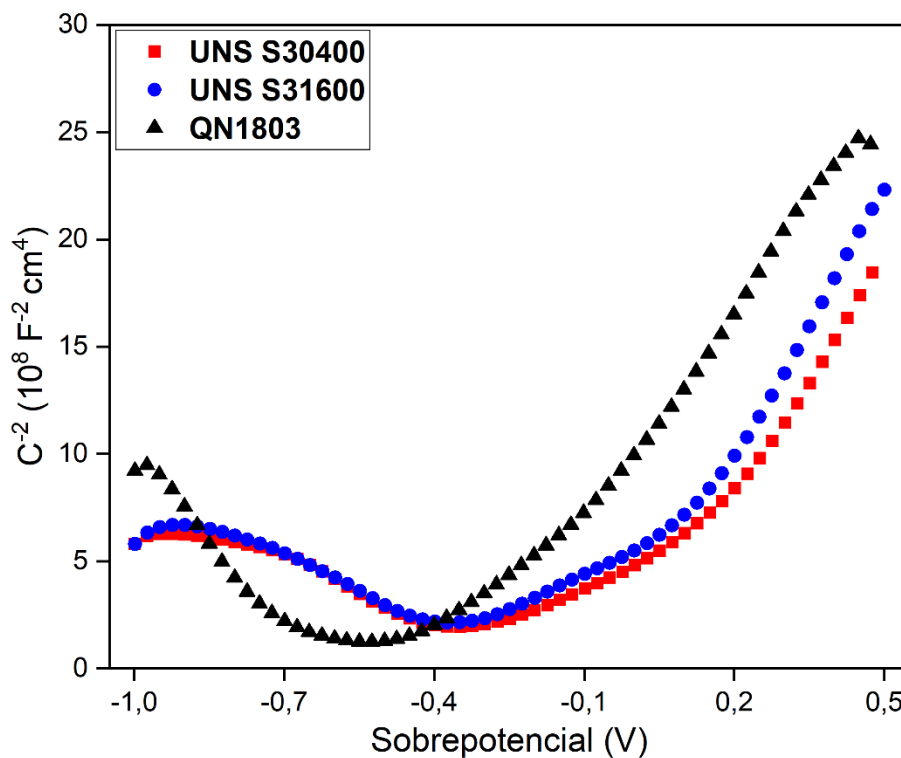


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

6.7 Capacitância Mott-Schottky

A Figura 16 mostra os gráficos de capacitância Mott-Schottky para os aços estudados, relacionando o inverso do quadrado da capacitância ao sobrepotencial. O intervalo de potencial utilizado abrange os comportamentos de semicondutor tipo p , tipo n e o intervalo de potencial de banda plana (E_{BP}), identificado na mudança de inclinação das curvas, indicando a inversão da propriedade semicondutora.

Figura 16 – Curvas de capacitância Mott-Schottky dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

As curvas mostraram comportamentos semelhantes, praticamente sobrepostos, com regiões de inclinação negativa indicando um comportamento semicondutor do tipo p , e regiões de inclinação positiva referentes ao tipo n . No semicondutor do tipo p , os principais portadores de carga iônica foram as vacâncias de cátions, enquanto no tipo n , os principais portadores foram as vacâncias de oxigênio e cátions intersticiais (Cheng *et al.*, 2022).

Na Tabela 8, foram apresentados os limites de sobrepotencial que definiram o intervalo de E_{BP} para cada aço. Os parâmetros E_n e E_p representaram o sobrepotencial obtido por extrapolação linear das retas de inclinação positiva e negativa das curvas, considerando $C^{-2} = 0$. O ΔE_{np} indicou a extensão do intervalo.

Tabela 8 – Limites de sobrepotencial que delimitam o intervalo de ocorrência do potencial de banda plana dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.

Aços	E_n (V)	E_p (V)	ΔE_{np} (V)
UNS S30400	-0,06	-0,28	0,23
UNS S31600	-0,08	-0,25	0,17
QN1803	-0,37	-0,69	0,32

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O intervalo de ocorrência do E_{BP} indica a região de equilíbrio do semicondutor com o potencial redox da solução, sem transferência de carga. A análise, aliada ao estudo de filmes passivos semicondutores, revela um equilíbrio entre as densidades de doadores e aceptores, refletindo na estabilidade do filme. Além disso, menores valores de potencial de banda plana são benéficos para os materiais, sugerindo uma melhora na resistência à corrosão (Cheng *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023; Oguzie *et al.*, 2010).

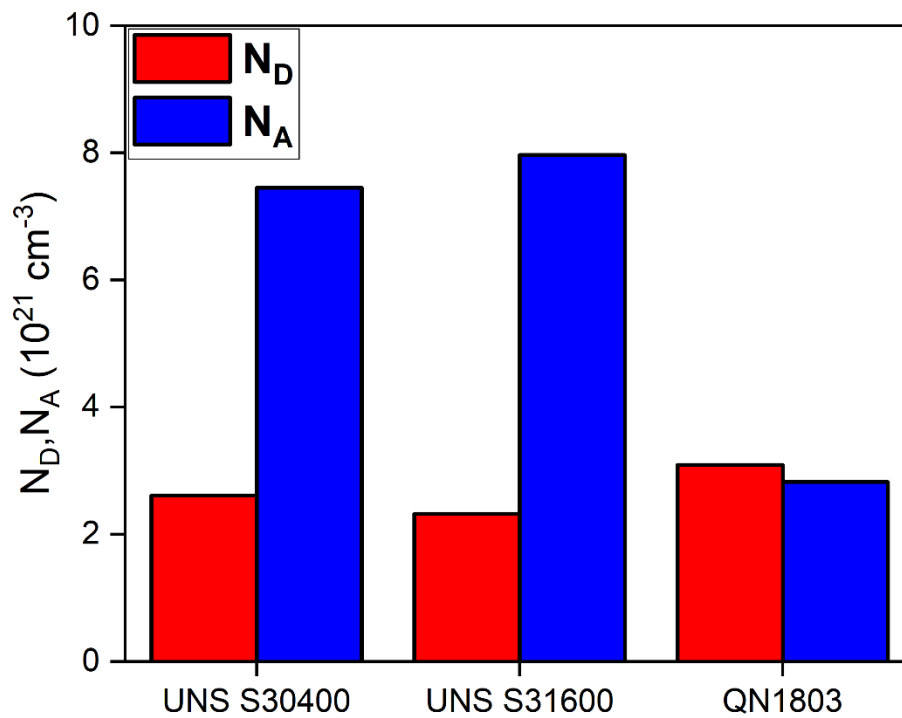
Os valores dos potenciais de banda plana dos aços estudados, em condições de sobrepotencial, variaram consideravelmente entre si. Essas discrepâncias são geralmente atribuídas à variação na afinidade de absorção ou adsorção dos ânions no filme passivo, ou à adsorção específica do Cl^- no filme (Ningshen *et al.*, 2007). O aço QN1803 destacou-se em relação aos demais, apresentando tanto um maior ΔE_{np} , que indicou um intervalo mais amplo de estabilidade do filme, quanto menores valores de potencial de banda plana, indicando uma melhor resistência à corrosão.

Estudos associaram as curvas ao padrão dos aços inoxidáveis, descrevendo o filme passivo como uma estrutura duplex. A camada interna, semicondutora do tipo p , é rica em cromo e nitrogênio, enquanto a externa, semicondutora do tipo n , é rica em ferro. O cromo enriquece a camada interna devido à sua oxidação preferencial, enquanto íons de ferro, de rápida difusão, atingem a camada externa. Já os íons de cromo, com difusão mais lenta, permanecem na camada interna (Fernández-Domene *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2012).

As densidades de doadores (N_D) e de aceptores (N_A) corresponderam ao grau de desordem do filme passivo, à não estequiometria do sistema e à presença de defeitos. Os valores de N_A e de N_D dos aços estudados, referentes à camada mais interna (Cr_2O_3) e à camada mais externa do filme (Fe_2O_3), respectivamente, foram calculados a partir da relação de Mott-Schottky, baseando-se nas inclinações das curvas C^{-2} vs E . Os resultados foram apresentados na Figura 17.

A concentração de dopantes dos aços estudados foi semelhante, na ordem de 10^{21} cm^{-3} , valores consistentes com os encontrados na literatura para aços inoxidáveis. Isso sugeriu que os filmes passivos formados possuíam propriedades eletrônicas similares, sendo altamente dopados e desordenados (Cheng *et al.*, 2022; Fernández-Domene *et al.*, 2014).

Figura 17 – Gráfico com densidades de doadores (N_D) e de aceptores (N_A) dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os valores de N_A para os aços UNS S31600 e UNS S30400 foram aproximadamente duas vezes maiores do que a densidade de aceptores do aço QN1803. Em contrapartida, N_D para os três aços foi semelhante, com a densidade de doadores do QN1803 sendo discretamente superior. Em geral, a estabilidade do filme passivo e a resistência à corrosão foram associadas principalmente à densidade de doadores de elétrons. Os defeitos relacionados a N_D , como vacâncias de oxigênio e cátions intersticiais, desempenharam um papel fundamental na resistência à corrosão dos materiais. Isso ocorreu porque a presença desses dopantes influenciou o transporte de carga no metal e a entrada de ânions corrosivos do eletrólito, como o íon cloreto (Cl^-). Além disso, a densidade de doadores influenciou a capacidade de nucleação de pites na superfície dos materiais. Portanto, densidades reduzidas de dopantes indicaram um filme passivo com menos defeitos, tornando-o mais estável e menos suscetível à penetração de ânions (Cheng *et al.*, 2022; Ningshen *et al.*, 2007).

A discreta diminuição da densidade de doadores no aço UNS S31600, em comparação com o aço UNS S30400, pode ser atribuída à presença de molibdênio em sua composição. Esse elemento não alterou a estrutura eletrônica do filme passivo, mas reduziu significativamente os valores de capacitância, especialmente para o semicondutor do tipo n . Isso ocorreu devido ao aumento da concentração de molibdênio na superfície da camada passiva, onde as espécies químicas de MoO_4^{-2} , distribuídas uniformemente no filme, interagiram com as vacâncias de oxigênio e os cátions intersticiais (Fernández-Domene *et al.*, 2014).

O teor de níquel exerceu uma influência mínima no comportamento semicondutor dos aços austeníticos, devido à sua quase inexistência na composição dos filmes passivos. Em contrapartida, o aumento do teor de nitrogênio esteve diretamente relacionado à redução da densidade de doadores e aceptores, uma vez que a presença de nitrogênio pode diminuir a concentração de defeitos no filme passivo (Fernández-Domene *et al.*, 2014; Ningshen *et al.*, 2007). Dessa forma, a redução do teor de níquel na composição do aço QN1803 não gerou impacto significativo em suas propriedades eletrônicas, enquanto o aumento do teor de nitrogênio pode ter contribuído para a diminuição da densidade de doadores.

6.8 Resistência à corrosão por pite (ASTM G48-A)

A fórmula de equivalente de resistência à corrosão por pite (PREN) é amplamente utilizada para classificar a resistência à corrosão por pite dos aços inoxidáveis. A literatura apresenta diversas formulações que consideram o impacto dos elementos de liga na resistência à corrosão. Contudo, a presença de nitrogênio e manganês na composição do material afeta diretamente essa propriedade (Cheng *et al.*, 2021; Rondelli; Vicentini; Cigada, 1995).

Neste contexto, foi proposta na literatura a utilização da fórmula apresentada na Equação 7, que se mostrou eficaz para a análise da resistência à corrosão localizada (Jiang *et al.*, 2020). A Tabela 9 exibe os resultados obtidos para o parâmetro PREN de cada um dos aços estudados, considerando, para os aços 304 e 316, o percentual de nitrogênio padrão da norma, já que o percentual exato não foi identificado na leitura do equipamento.

$$PREN = [Cr] + 3,3[Mo] + 30[N] - [Mn] \quad (7)$$

O valor referente ao aço 316 foi superior aos dos outros aços, que apresentaram valores iguais, sugerindo uma maior resistência à corrosão localizada. Esse parâmetro é utilizado como base para a comparação da resistência à corrosão entre aços inoxidáveis. Por exemplo, o elemento cromo atua no controle da formação do filme passivo e do potencial de quebra, enquanto o molibdênio contribui para a capacidade de repassivação da liga (Klapper; Rebak, 2017).

No entanto, o PREN não foi suficiente para fornecer um ranqueamento adequado das ligas em termos de resistência à corrosão localizada, o que justificou a aplicação da análise de resistência à corrosão por pite, de acordo com a norma ASTM G48-A.

Tabela 9 – Valores de equivalente de resistência à corrosão por pite (PREN) dos aços UNS S30400, UNS S31600 e QN1803.

Aços	UNS S30400	UNS S31600	QN1803
PREN (%)	19,78	24,68	19,78

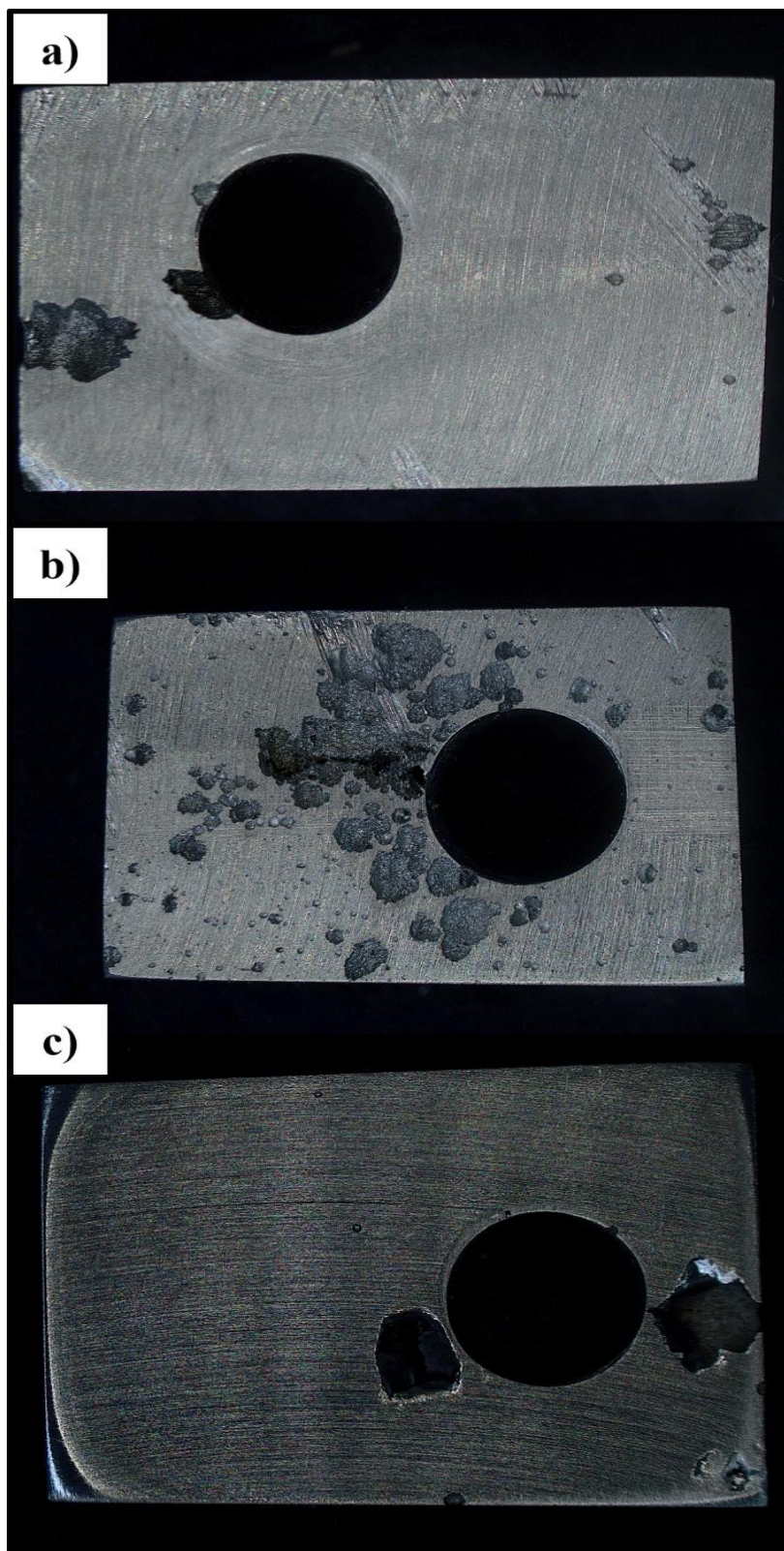
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Figura 18 apresentou micrografias de baixa ampliação (6x) para cada um dos aços estudados. Todos os três aços exibiram sinais de corrosão localizada em suas superfícies, especialmente ao redor do furo presente em todas as amostras, utilizado para facilitar a suspensão na solução. Tanto o aço UNS S30400 quanto o aço QN1803 mostraram aspectos semelhantes de degradação, com um ataque corrosivo suficiente para gerar profundidade. No entanto, apenas o aço UNS S30400 apresentou desgaste visível no restante da superfície. Em contraste, o aço UNS S31600 sofreu mais com o desgaste superficial, mas sem grande profundidade.

A Figura 19 exibiu um gráfico com a média de perda de massa medida em cada aço ao final das 72 horas de imersão. Com base principalmente nos dados de desvio padrão, os três aços apresentaram uma taxa de perda de massa praticamente igual, próxima a $0,06 \text{ g/cm}^2$. Isso indicou que o aço QN1803 sofreu uma degradação por corrosão localizada semelhante à dos demais.

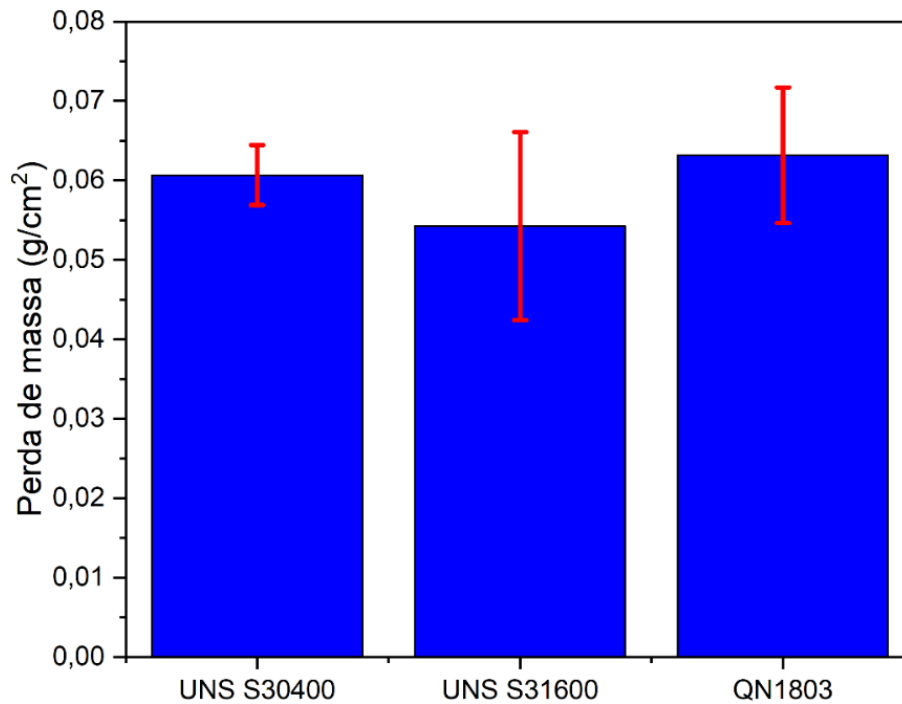
Foram registradas 13 micrografias com ampliações médias (200x) para cada aço estudado. A Figura 20 mostrou uma micrografia representativa de cada material, exibindo padrões característicos de corrosão, juntamente com as imagens analisadas no software ImageJ. As imagens foram convertidas para escala de cinza e ajustadas para eliminar o máximo possível de regiões escuras que não correspondessem a pites. Em seguida, utilizou-se a ferramenta "Analyse Particles" do software ImageJ, que contabilizou as regiões escuras da imagem e calculou automaticamente cada área, com base na escala apresentada. Para garantir que a maioria das áreas medidas correspondesse a pites, foi estabelecida uma área mínima de $5 \mu\text{m}^2$.

Figura 18 – Micrografias obtidas de um microscópio estereoscópio dos aços (a) UNS S30400, (b) UNS S31600 e (c) QN1803, após o ensaio de resistência à corrosão por pite. Aumento: 6x.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 19 – Gráficos de média de perda de massa do aço UNS S30400, UNS S31600 e QN1803, após o ensaio de resistência à corrosão por pite.

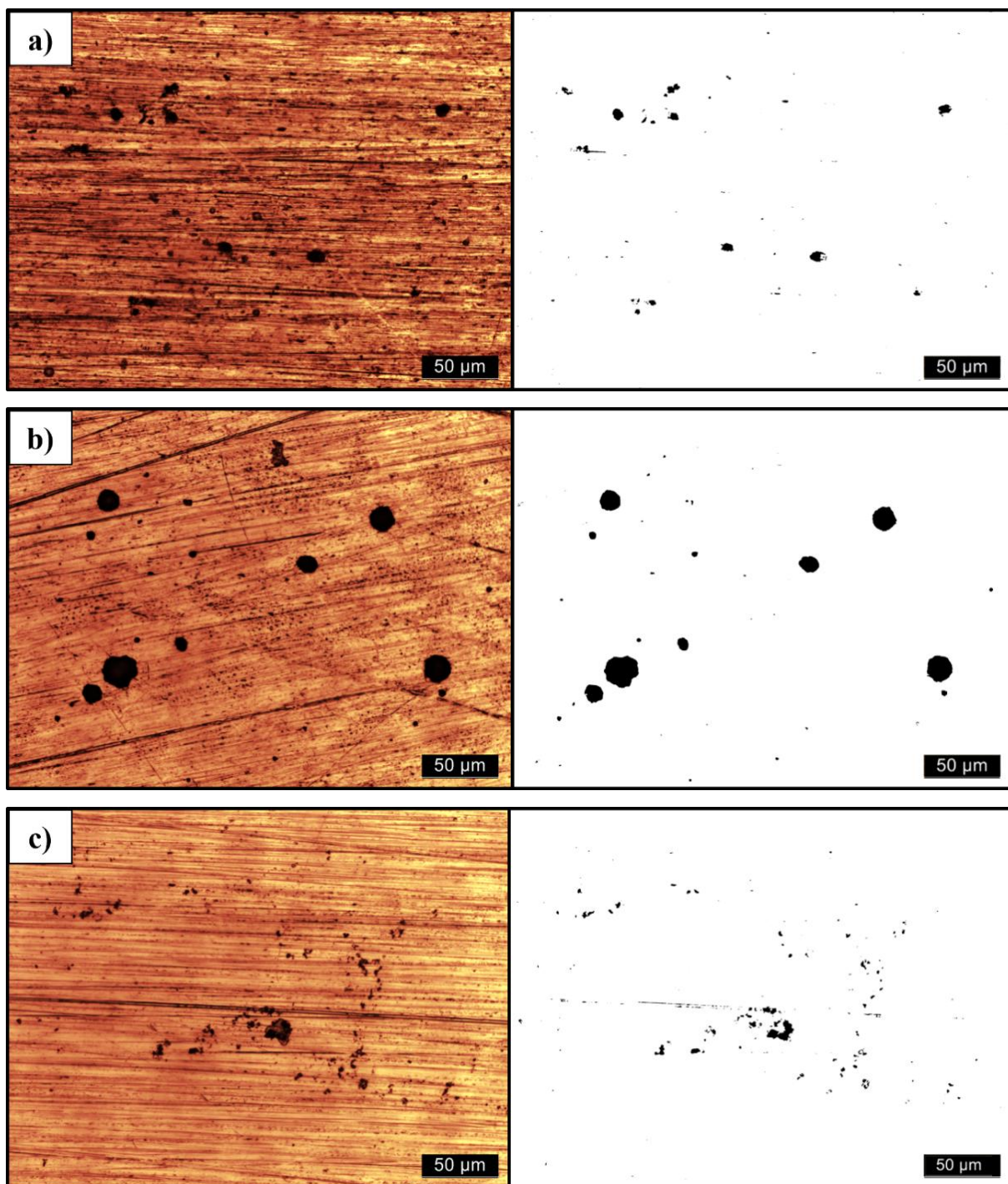


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Figura 21 exibe gráficos que descrevem o perfil de frequência de aparecimento de pites, classificados por tamanhos: A (até $10 \mu m^2$), B (entre 10 e $20 \mu m^2$), C (entre 20 e $50 \mu m^2$), D (entre 50 e $100 \mu m^2$), E (entre 100 e $300 \mu m^2$) e F (acima de $300 \mu m^2$). Os gráficos também apresentam uma curva de frequência acumulada, onde o patamar de 100% corresponde a toda a base de dados de pites catalogados para cada tipo de aço.

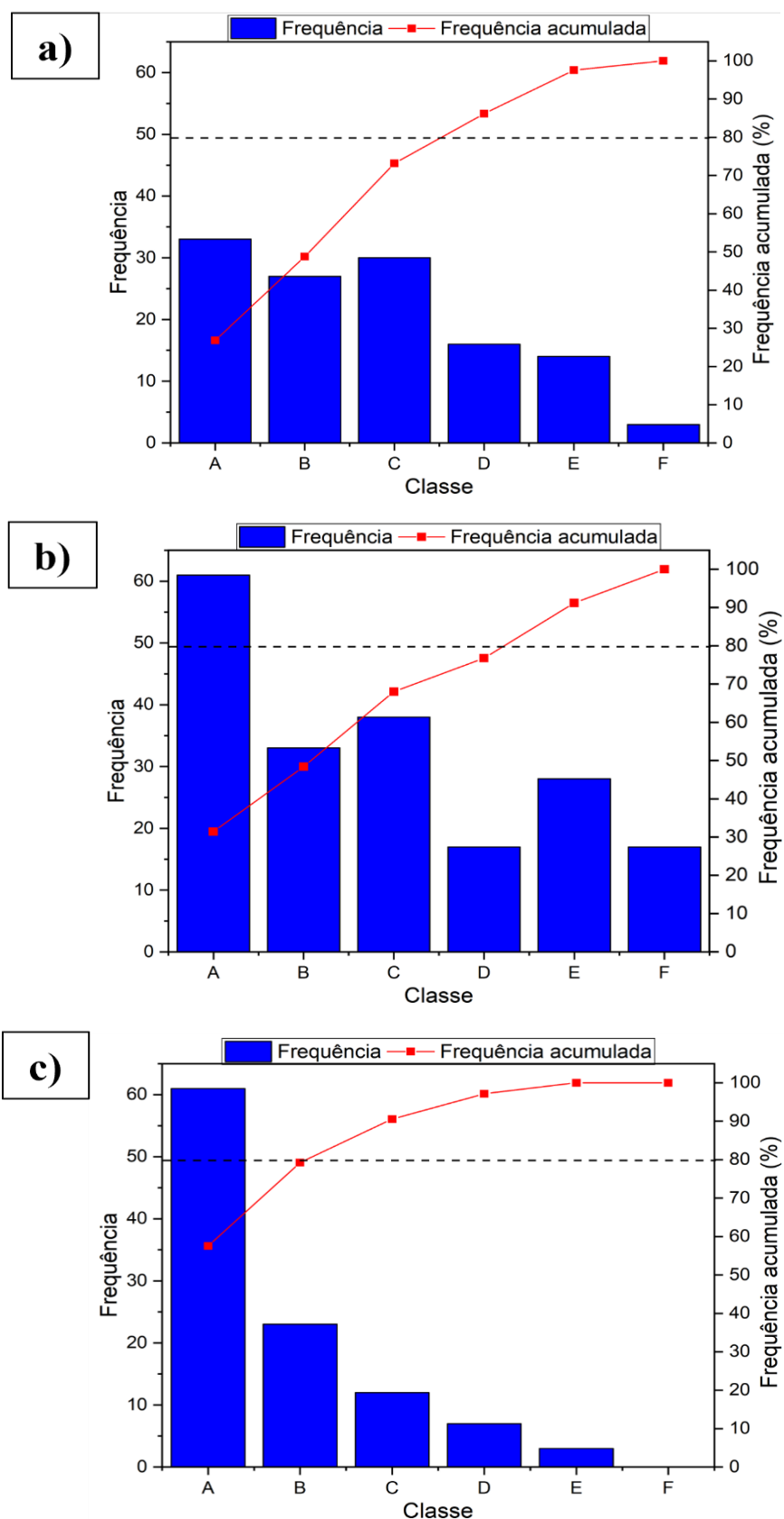
Os gráficos permitiram analisar que cerca de 80% dos dados coletados para os aços 304, 316 e QN1803 incluíam pites de até as classes C, D e B, respectivamente. O fato de o aço QN1803 apresentar a maioria dos pites com tamanho inferior a $20 \mu m^2$ pode indicar uma alta capacidade de nucleação de pites, mas com baixo crescimento de área, o que é justificado pela baixa frequência de pites maiores. Por outro lado, os aços 304 e 316 demonstraram capacidades semelhantes de nucleação de pites, com 50% dos pites analisados pertencendo às classes A e B. No entanto, esses aços exibiram um elevado crescimento de área dos pites, atingindo áreas superiores a $300 \mu m^2$, o que não foi observado no aço QN1803.

Figura 20 – Micrografias ópticas após o ensaio de resistência à corrosão por pite, à esquerda, e análises das imagens pelo software ImageJ, à direita, dos aços (a) UNS S30400, (b) UNS S31600 e (c) QN1803. Aumento: 200x.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

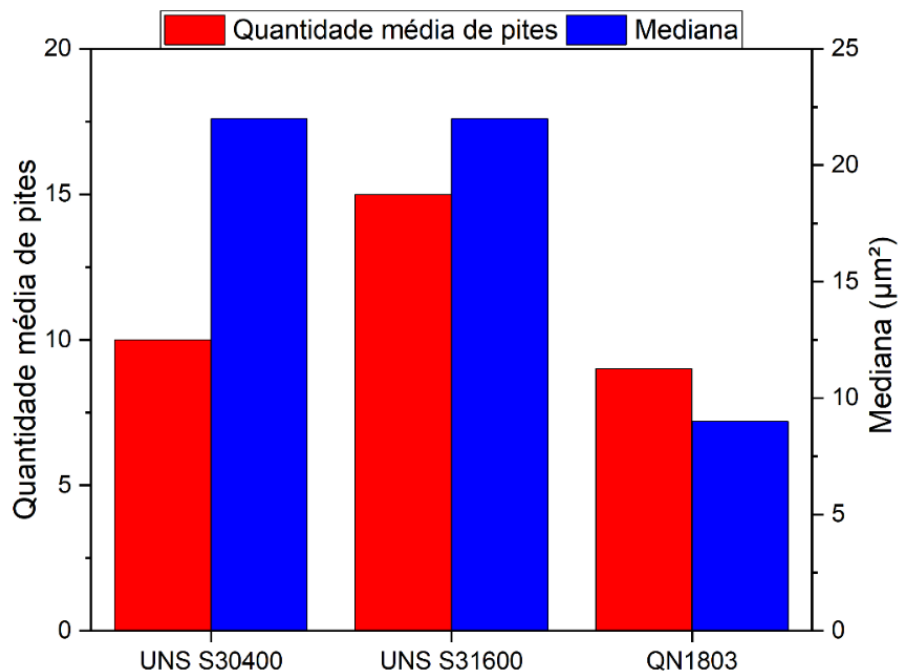
Figura 21 – Gráficos de perfil de frequência e frequência acumulada de pites coletados dos aços (a) UNS S30400, (b) UNS S31600 e (c) QN1803, após o ensaio de resistência à corrosão por pite.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Figura 22 apresenta um gráfico que ilustra o tamanho médio dos pites catalogados para cada tipo de aço estudado, bem como a quantidade média de pites por micrografia. A base de dados de cada aço abrange uma ampla gama de tamanhos de pites, variando de mínimos ($5 \mu m^2$) a superiores a $100 \mu m^2$. Devido à grande dispersão entre os dados, a média não foi o parâmetro mais eficiente para essa análise estatística, pois poderia resultar em uma falsa interpretação da amostra. Assim, foram utilizadas as medianas de cada base de dados, uma vez que a mediana é um parâmetro mais representativo do valor central do conjunto, não sendo influenciada por valores extremos, mas pela quantidade de dados.

Figura 22 – Gráficos de quantidade e tamanho médio de pite do aço UNS S30400, UNS S31600 e QN1803, após o ensaio de resistência à corrosão por pite.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

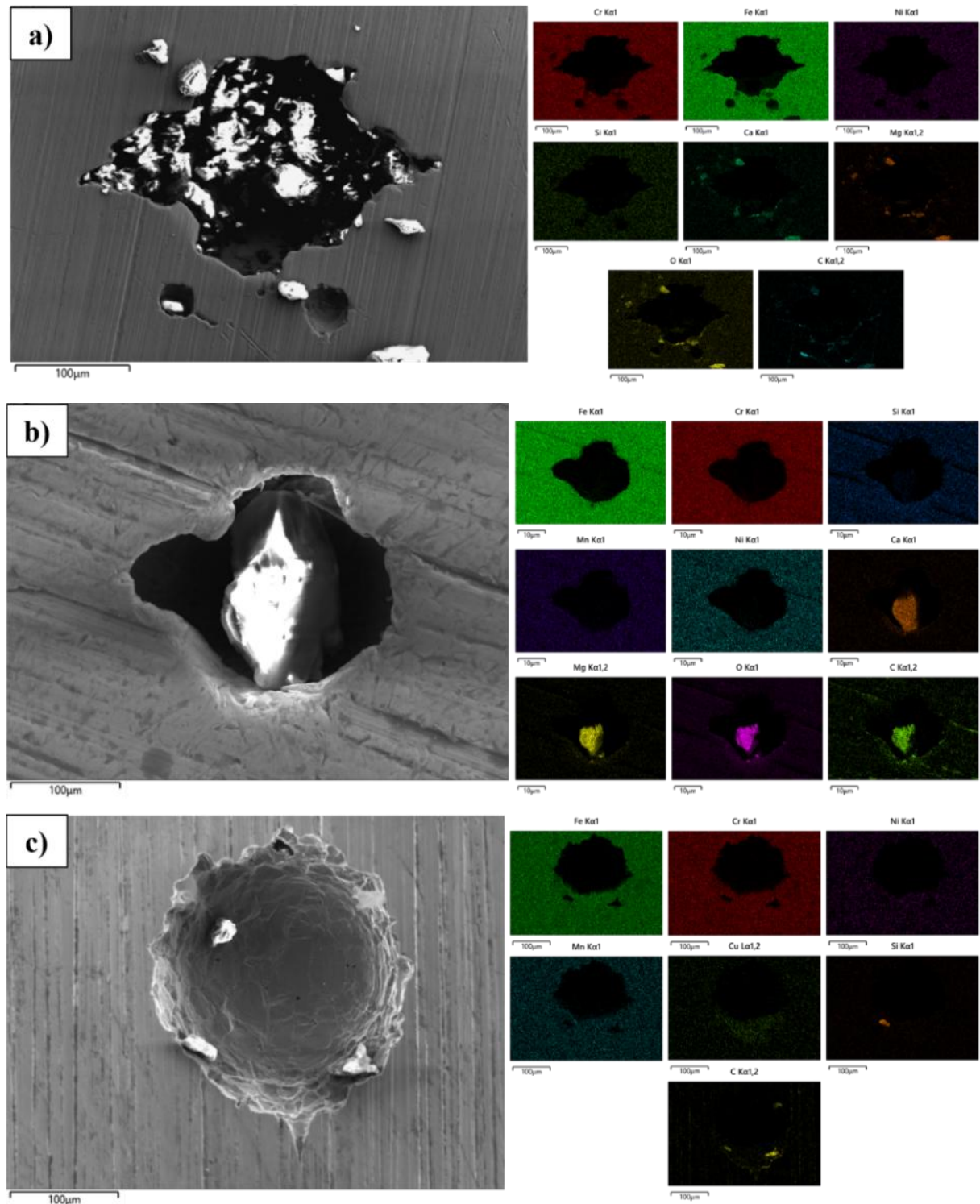
De acordo com o gráfico, o aço QN1803 apresentou um desempenho superior em comparação com os demais aços, exibindo a menor quantidade média de pites por micrografia e a menor mediana em relação à área dos pites. Esse resultado indicou que o aço QN1803 possui uma resistência à corrosão por pite superior, especialmente em ambientes com alto teor de cloreto. Os outros aços apresentaram medianas iguais, quase três vezes maiores que a área identificada no aço QN1803. Além disso, eles demonstraram uma maior tendência à formação de pites, com destaque para o aço UNS S31600, que exibiu quase o dobro da quantidade média de pites em comparação com os outros aços.

As amostras foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raio-X por energia dispersiva (EDS), utilizando o microscópio eletrônico de transmissão JEOL JEM 1011, na Universidade Federal Fluminense.

A Figura 23 apresentou a morfologia tridimensional dos pites identificados em cada tipo de aço, além das respectivas composições químicas das áreas indicadas. Os pites exibiram uma forma aproximadamente esférica. Nas micrografias dos aços UNS S30400 e UNS S31600, foram encontradas inclusões ricas em óxidos e carbonetos de cálcio e magnésio no interior dos pites analisados. Isso indicou que os pites tendiam a se formar em áreas com defeitos ou inclusões superficiais, devido à diferença de composição entre essas inclusões e a matriz do aço, o que gerava uma força motriz intensa para a dissolução do sistema (Wang *et al.*, 2018).

No aço QN1803, não foram encontradas inclusões dentro dos pites, observando-se apenas alguns poucos carbonetos de silício, que provavelmente resultaram de contaminação durante o preparo das amostras.

Figura 23 – Análise de MEV/EDS de pites e inclusões do aço (a) UNS S30400, (b) UNS S31600 e (c) QN1803, após o ensaio de resistência à corrosão por pite.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

7 CONCLUSÃO

- O aço QN1803 apresentou características microestruturais e de dureza semelhantes aos aços inoxidáveis da classe 300, apesar de sua microestrutura austenítica ter sido encontrada em condição de sensitização.
- O aço QN1803 apresentou tendência de estabilização do potencial de circuito aberto em valores mais positivos, apesar de altos teores de cloreto geralmente induzirem potenciais mais negativos em aços inoxidáveis.
- Os ensaios eletroquímicos de polarização linear, cronoamperometria e temperatura crítica de pite do aço QN1803 demonstraram uma resistência à corrosão superior à dos demais materiais, devido à formação de um filme passivo estável e de alta resistência, favorecida pela estabilização e repassivação proporcionadas pelo teor de nitrogênio na composição.
- Os ensaios de impedância eletroquímica e capacitância Mott-Schottky do aço QN1803 demonstraram que este material apresentou resistência à corrosão comparável à dos demais, formando um filme passivo estável de alta qualidade protetora e com menor suscetibilidade à penetração de íons cloreto.
- Embora o aço QN1803 tenha apresentado um valor de PREN reduzido em comparação aos outros aços, o estudo de resistência à corrosão por pites revelou uma degradação por corrosão localizada semelhante, com base nos resultados da taxa de perda de massa. A análise dos pites revelou que o QN1803 demonstrou alta capacidade de nucleação de pites, mas com crescimento de área reduzido, enquanto os outros aços apresentaram uma intensa capacidade de crescimento.
- O estudo demonstrou que o aço inoxidável austenítico QN1803 apresentou desempenho superior em resistência à corrosão em ambientes com alto teor de cloreto, quando comparado às ligas UNS S30400 e UNS S31600. Esses resultados sugerem que o QN1803 é uma alternativa promissora aos aços inoxidáveis austeníticos convencionais, oferecendo maior durabilidade e resistência em condições corrosivas severas.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A240/A240M**: Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?A240A240M-22A>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E407**: Practice for Microetching Metals and Alloys. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E407-07R15E1>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G46-21**: Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G46-21>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G48-11**: Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G48-11R20E1>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G150**: Test Method for Electrochemical Critical Pitting Temperature Testing of Stainless Steels. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G150-18>.
- APERAM. **Aço inoxidável**: a solução perfeita para o desenvolvimento sustentável. [S. l.: s. n.], 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6508**: Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BABA, H.; KODAMA, T.; KATADA, Y. Role of nitrogen on the corrosion behavior of austenitic stainless steels. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 44, n. 10, p. 2393–2407, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X02000409>.
- BADDOO, N. R. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], v. 64, n. 11, p. 1199–1206, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X08001831>.
- BEDDOES, J.; PARR, J. G. **Introduction to stainless steels**. 3. ed. Ohio: ASM International, 1999.
- BHADESHIA, H.; HONEYCOMBE, R. **Steels**: microstructure and properties. 4. ed. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2017.

BHANDARI, J. *et al.* Accelerated pitting corrosion test of 304 stainless steel using ASTM G48; Experimental investigation and concomitant challenges. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 47, p. 10–21, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095042301630345X>. Acesso em: 1 fev. 2024.

BOTT, A. W. Electrochemistry of semiconductors. **Current separations**, [s. l.], v. 17, p. 87–92, 1998.

BRIGHAM, R. J.; TOZER, E. W. Effect of alloying additions on the pitting resistance of 18% Cr austenitic stainless steel. **Corrosion**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 161–166, 1974.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. Corrosion and Degradation of Materials. In: CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. (org.). **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. 5. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2020. p. 711–753.

CHAVES, R. *et al.* Evaluation of selective corrosion in UNS S31803 duplex stainless steel with electrochemical impedance spectroscopy. **Electrochimica Acta**, [s. l.], v. 51, n. 8, p. 1842–1846, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468605007875>.

CHENG, M. *et al.* Comparative studies on microstructure evolution and corrosion resistance of 304 and a newly developed high Mn and N austenitic stainless steel welded joints. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 183, p. 109338, 2021.

CHENG, H. *et al.* Electrochemical corrosion and passive behavior of a new high-nitrogen austenitic stainless steel in chloride environment. **Materials Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 292, p. 126837, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058422011439>.

CRAMER, S. D. *et al.* **ASM handbook**. [S. l.]: ASM international Materials Park, Ohio, 2003. v. 13

DASTGERDI, A. A. *et al.* Experimental design to study the influence of temperature, pH, and chloride concentration on the pitting and crevice corrosion of UNS S30403 stainless steel. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 159, p. 108160, 2019.

DILLON, C. P. **Corrosion resistance of stainless steels**. New York: CRC Press, 1995.

FERNANDES, J. C. **Desenvolvimento de um dispositivo tipo carga constante para avaliação da susceptibilidade de aços inoxidáveis à corrosão sob tensão**. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

FERNÁNDEZ-DOMENE, R. M. *et al.* Effect of alloying elements on the electronic properties of thin passive films formed on carbon steel, ferritic and austenitic stainless steels in a highly concentrated LiBr solution. **Thin Solid Films**, [s. l.], v. 558, p. 252–258, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609014003149>.

FERREIRA, R. Q.; AVACA, L. A. Electrochemical determination of the antioxidant capacity of industrialized fruits juices using the CRAC assay. **Química Nova**, [s. l.], v. 31, p. 2169–2173, 2008.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GERISCHER, H. Models for the discussion of the photo-electrochemical response of oxide layers on metals. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 29, n. 2–3, p. 257–266, 1989. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0010938X89900346>. Acesso em: 14 abr. 2024.

GHARIB, A.; ARAB, A. Electrodeposited Pd, Pd Cd, and Pd Bi nanostructures: Preparation, characterization, corrosion behavior, and their electrocatalytic activities for formic acid oxidation. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, [s. l.], v. 866, p. 114166, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1572665720303490>.

GRABKE, H. J. The role of nitrogen in the corrosion of iron and steels. **Isij International**, [s. l.], v. 36, n. 7, p. 777–786, 1996.

HAKIKI, N. B. *et al.* The electronic structure of passive films formed on stainless steels. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 37, n. 11, p. 1809–1822, 1995. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0010938X9500084W>. Acesso em: 14 abr. 2024.

HÉCTOR, E.; CARBÓ, M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. São Paulo: [s. n.], 2008.

HEMKEMEIER, T. A. *et al.* Corrosion monitoring by open circuit potential in steel reinforcements embedded in cementitious composites with industrial wastes. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 16, p. e01042, 2022.

HIROMOTO, S. Corrosion of metallic biomaterials. In: HIROMOTO, S. (org.). **Metals for Biomedical Devices**. 2. ed. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 131–152. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081026663000043>. Acesso em: 1 fev. 2024.

JAVIDI, M.; HAGHSHENAS, S. M. S.; SHARIAT, M. H. CO₂ corrosion behavior of sensitized 304 and 316 austenitic stainless steels in 3.5 wt.% NaCl solution and presence of H₂S. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 163, p. 108230, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X19300010>. Acesso em: 17 abr. 2024.

JIANG, Y. *et al.* Microstructure and properties of 08Cr19Mn6Ni3Cu2N (QN1803) high strength nitrogen alloyed lownickel austenitic stainless steel. **Acta Metall Sin**, [s. l.], v. 56, n. 4, p. 642–652, 2020.

JIMÉNEZ, Y. S. *et al.* Interpretation of open circuit potential of two titanium alloys for a long time immersion in physiological fluid. **Bulletin of the Transilvania University of Braşov**, [s. l.], v. 2, p. 51, 2009.

JONES, D. A. **Principles and prevention**. 2. ed. United States: Pearson, 1996.

KALADHAR, M.; SUBBAIAH, K. V.; RAO, C. H. S. Machining of austenitic stainless steels - a review. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, [s. l.], v. 12, n. 1/2, p. 178, 2012. Disponível em: <http://www.inderscience.com/link.php?id=48564>.

KANIA, H. Corrosion and anticorrosion of alloys/metals: The important global issue. **Coatings**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 216, 2023.

KLAPPER, H. S.; REBAK, R. B. Assessing the Pitting Corrosion Resistance of Oilfield Nickel Alloys at Elevated Temperatures by Electrochemical Methods. **CORROSION**, [s. l.], v. 73, n. 6, p. 666–673, 2017. Disponível em: <https://meridian.allenpress.com/corrosion/article/73/6/666/163568/Assessing-the-Pitting-Corrosion-Resistance-of>.

KOCH, G. *et al.* International measures of prevention, application and economics of corrosion technologies study. **NACE International USA, Park Ten Place**, [s. l.], v. 15385, 2016.

KOKAWA, H.; SHIMADA, M.; SATO, Y. S. Grain-boundary structure and precipitation in sensitized austenitic stainless steel. **JOM**, [s. l.], v. 52, n. 7, p. 34–37, 2000.

KOUŘIL, M.; NOVÁK, P.; BOJKO, M. Limitations of the linear polarization method to determine stainless steel corrosion rate in concrete environment. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 220–225, 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946506000151>. Acesso em: 1 fev. 2024.

KUMAR, A. *et al.* A review on machining performance of AISI 304 steel. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 56, p. 2945–2951, 2022.

LI, Y. *et al.* Effect of alkaline solution concentration on the passivation film of Cu-Ni alloy. **Materiali in Tehnologije**, [s. l.], v. 57, n. 3, p. 249–255, 2023.

LI, H. *et al.* Electrochemical Corrosion Characteristics of Super Duplex Stainless Steel S32750 in LT-MED Environment. **International Journal of Electrochemical Science**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 1616–1631, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1452398123050988>. Acesso em: 1 fev. 2024.

LO, K. H.; SHEK, C. H.; LAI, J. K. L. Recent developments in stainless steels. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, [s. l.], v. 65, n. 4–6, p. 39–104, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927796X09000461>. Acesso em: 30 jan. 2024.

LOTO, R. T. Potentiodynamic polarization studies of the pitting corrosion resistance and passivation behavior of P4 low carbon mold steel in chloride and acid chloride solution. **Materials Research Express**, [s. l.], v. 5, n. 11, p. 116509, 2018.

MARSHALL, P. **Austenitic stainless steels: microstructure and mechanical properties**. 1. ed. [S. l.]: Springer Dordrecht, 1984-. ISSN 0853342776.

MIYATA, Y.; HANDA, T.; TAKAZAWA, H. An analysis of current fluctuations during passive film breakdown and repassivation in stainless alloys. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 31, p. 465–470, 1990. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010938X9090147W>.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. Osasco: SENAI, 2001. v. 1

MOHD YUSUF, S. *et al.* Microstructure and corrosion performance of 316L stainless steel fabricated by Selective Laser Melting and processed through high-pressure torsion. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 763, p. 360–375, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838818320176>.

MONTEMOR, M. F.; SIMÕES, A. M. P.; FERREIRA, M. G. S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 25, n. 4–5, p. 491–502, 2003.

MUDD, G. M.; JOWITT, S. M. The new century for nickel resources, reserves, and mining: reassessing the sustainability of the devil's metal. **Economic Geology**, [s. l.], v. 117, n. 8, p. 1961–1983, 2022.

NINGSHEN, S. *et al.* Semiconducting and passive film properties of nitrogen-containing type 316LN stainless steels. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 49, n. 2, p. 481–496, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X06001818>.

OGUZIE, E. E. *et al.* The effect of Cu addition on the electrochemical corrosion and passivation behavior of stainless steels. **Electrochimica Acta**, [s. l.], v. 55, n. 17, p. 5028–5035, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013468610005505>. Acesso em: 14 abr. 2024.

OLEFJORD, I.; WEGRELIUS, L. The influence of nitrogen on the passivation of stainless steels. **Corrosion science**, [s. l.], v. 38, n. 7, p. 1203–1220, 1996.

OTERO, E. *et al.* Influencia de la composición química en la resistencia a la corrosión por picadura de los aceros inoxidables. **BOLETIN-SOCIEDAD ESPANOLA DE CERAMICA Y VIDRIO**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 190–192, 2004.

PADILHA, A. F.; RIOS, P. R. Decomposition of austenite in austenitic stainless steels. **ISIJ international**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 325–327, 2002.

PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. 1. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993. v. 1

PARDO, A. *et al.* Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 50, n. 6, p. 1796–1806, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X08001327>.

PARDO, A. *et al.* Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels with Cu and Sn additions. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 49, n. 2, p. 510–525, 2007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X06001910>. Acesso em: 1 fev. 2024.

PEREIRA, U. C. **Avaliação da influência da precipitação de fases intermetálicas na resistência à corrosão do aço inoxidável superferrítico**. 2019. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

POURSAEE, A. Corrosion measurement and evaluation techniques of steel in concrete structures. In: POURSAEE, A. (org.). **Corrosion of Steel in Concrete Structures**. [S. l.]: Elsevier, 2023. p. 219–244. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128218402000274>. Acesso em: 1 fev. 2024.

QUEIROZ, C. H. B. **Estudo da influência do pH do eletrólito no comportamento eletroquímico das ligas UNS S41003 e ENDUR 300**. 2021. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

RIBEIRO, D. V.; ABRANTES, J. C. C. Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 111, p. 98–104, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816301064>. Acesso em: 1 fev. 2024.

RIBEIRO, D. V.; SOUZA, C. A. C.; ABRANTES, J. C. C. Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) to monitoring the corrosion of reinforced concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 529–546, 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952015000400529&lng=en&tlng=en. Acesso em: 1 fev. 2024.

RONDELLI, G.; VICENTINI, B.; CIGADA, A. Influence of nitrogen and manganese on localized Corrosion behaviour of stainless steels in chloride environments. **Materials and Corrosion**, [s. l.], v. 46, n. 11, p. 628–632, 1995. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/maco.19950461104>.

SANUSI, M. S. *et al.* Electrochemical corrosion behaviours of AISI 304 austenitic stainless steel in NaCl solutions at different pH. **AIP Conference Proceedings**. [S. l.]: American Institute of Physics Inc., 2018. p. 020116. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/799603>.

SCHWENK, W. Theory Of Stainless Steel Pitting. **Corrosion**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 129t–137t, 1964. Disponível em: <https://meridian.allenpress.com/corrosion/article/20/4/129t/157561/Theory-Of-Stainless-Steel-Pitting>.

SEDRIKS, A. J. **Corrosion of stainless steels**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. v. 15

SHEETS. **Stainless Steel Grade Datasheets**. [S. l.]: Atlas Steels Technical Department, 2013.

SHEIK, S. *et al.* Effect of microstructural morphology on corrosion susceptibility of austenitic and super austenitic stainless steels. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 66, p. 514–518, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785322040706>. Acesso em: 18 abr. 2024.

SIMÕES, A. M. P. *et al.* Study of Passive Films Formed on AISI 304 Stainless Steel by Impedance Measurements and Photoelectrochemistry. **Journal of The Electrochemical Society**, [s. l.], v. 137, n. 1, p. 82–87, 1990. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2086444>.

SMALL, K. B.; ENGLEHART, D. A.; CHRISTMAN, T. A. Etching specialty alloys. **Adv. Mater. Process**, [s. l.], v. 166, p. 32–37, 2008.

SUNSERI, C.; PIAZZA, S.; DI QUARTO, F. Photocurrent Spectroscopic Investigations of Passive Films on Chromium. **Journal of The Electrochemical Society**, [s. l.], v. 137, n. 8, p. 2411–2417, 1990. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2086952>.

TERADA, M. **Corrosão de aços inoxidáveis avançados em meios fisiológicos**. 2008. 187 f. Tese (Doutorado em Ciência na área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-14092009-161908/>.

VARBAI, B. *et al.* Microstructure and corrosion properties of austenitic and duplex stainless steel dissimilar joints. **Periodica Polytechnica Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 66, n. 4, p. 344–349, 2022.

VON WANDRUSZKA, R.; ORCHARD, S. W.; GREEFF, A. Corrosion measurements by potential-step chronoamperometry. **Talanta**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 307–311, 1985. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0039914085800850>.

WANG, Y. *et al.* Role of inclusions in the pitting initiation of pipeline steel and the effect of electron irradiation in SEM. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 130, p. 252–260, 2018.

WEI, Z. *et al.* Study of mechanical and corrosion properties of a Fe–21.4Cr–6Mn–1.5Ni–0.24N–0.6Mo duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 497, n. 1, p. 501–504, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509308009271>.

XIA, D. *et al.* A mechanistic study on thiosulfate-enhanced passivity degradation of Alloy 800 in chloride solutions. **Electrochimica Acta**, [s. l.], v. 111, p. 510–525, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468613015582>.

XIE, Y. *et al.* Corrosion behaviour of stainless steel exposed to highly concentrated chloride solutions. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 283–293, 2017.

ZHAO, H. *et al.* Insights into the impact behavior and deformation substructure evolution of the n-bearing QN1803 and 304 stainless steels. **Steel Research International**, [s. l.], v. 94, n. 10, 2023.

ZHOU, Y. *et al.* Full-range plasticity of novel high-performance low-cost stainless steel QN1803. **Steel and Composite Structures**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 739–752, 2020.

ZHU, X. M. *et al.* Effect of Nitrogen on Semiconducting Properties of Passive Films of a High Nitrogen Face-Centered-Cubic Phase Formed on Austenitic Stainless Steel. **Journal of The Electrochemical Society**, [s. l.], v. 159, n. 8, p. C319–C325, 2012. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.007208jes>.