



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS**  
**PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**ADRYEL VITOR BARBOSA DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DO GRAU DE SENSITIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO  
DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO COM BAIXO NÍQUEL**

**FORTALEZA**

**2026**

ADRYEL VITOR BARBOSA DA SILVA

INFLUÊNCIA DO GRAU DE SENSITIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE  
AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO COM BAIXO NÍQUEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada  
ao Curso de Graduação em Engenharia  
Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Engenheiro Metalurgista.

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.

FORTALEZA

2026

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)

---

D11i Silva, Adryel Vitor Barbosa da .  
Influência do grau de sensibilização na resistência à corrosão de aço inoxidável austenítico com baixo níquel / Adryel Vitor Barbosa da Silva. – 2026.  
46 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, 3, Fortaleza, 2026.  
Orientação: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.  
Coorientação: Prof. Me. Bruno Gomes Linhares.

1. Aço inoxidável austenítico. 2. Baixo teor de níquel. 3. QN1803. 4. Sensibilização. I. Título.  
CDD

---

ADRYEL VITOR BARBOSA DA SILVA

INFLUÊNCIA DO GRAU DE SENSITIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE  
AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO COM BAIXO NÍQUEL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Metalurgista.

Aprovada em: 16/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Dra. Roberta Bastos Vasques  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Emanuel Seixas Campos  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, irmão e familiares.

Aos meus amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por ter me concedido saúde, determinação e perseverança para seguir em frente e ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do curso.

Aos meus pais, Arlene Ribeiro e Francisco Leonildo, que me apoiaram diariamente e nunca deixaram de me incentivar e de acreditarem em mim. A meu irmão, Davi Luca, por trazer momentos de leveza e felicidade em minha vida. Aos meus avós, Irene Ribeiro e Francisco Barbosa, por me apoiarem desde criança a seguir meus sonhos e se tornar o que eu sou hoje. A todos meus familiares, desejo a vocês meu profundo amor e gratidão a todos.

Aos amigos de graduação, especialmente Luís Gustavo, Kauê Lourenzo, Livia Silva, dentre todos os outros, por estarem ao meu lado nos desafios e conquistas trajadas ao longo desses anos. Agradeço-lhes por todos os momentos de conversa, descontração e trocas de conhecimento que tornaram esta trajetória mais leve.

À professora Janaína Gonçalves, pelas oportunidades que me proporcionou, por acreditar em mim no início da minha graduação e pelos conhecimentos repassados, sempre acreditando em meu potencial nos momentos decisivos de minha caminhada

Ao professor Dr. Walney Silva Araújo, pela oportunidade de participar de seu laboratório e pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa em sua orientação, além do conhecimento repassado, com sugestões, críticas construtivas e apoio durante todo o processo.

Ao meu coorientador MSc. Bruno Linhares, por ter acreditado em mim como seu bolsista a ajudá-lo em suas pesquisas. Agradeço por ter me ensinado tudo sobre corrosão, pelas conversas e críticas construtivas sobre os mais variados temas, além de sua amizade. Sua orientação me ajudou a tornar o pesquisador e engenheiro que sou hoje.

Aos colegas do Laboratório de Pesquisa em Corrosão, em especial à Dra. Roberta Vasques, ao Dr. Caio Victor, ao Dr. Henrique Queiroz e à Dra. Ana Aline, e às colegas de estágio, pela orientação, suporte e amizade fundamentais ao longo de minha jornada. Agradeço também ao Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM), em especial ao Prof. Dr. Mauro Cerra e ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM), pelo apoio prestado na preparação e análise dos materiais ensaiados. À CNPq, pelo apoio financeiro inicial à pesquisa por meio da concessão da bolsa.

E, por fim, aos membros da banca avaliadora, por dedicarem seu tempo e esforço à análise deste trabalho.

Desejo meus sinceros agradecimentos a todos.

“A verdadeira motivação vem da realização, desenvolvimento pessoal, satisfação no trabalho e reconhecimento” (Herzberg, 1959).

## RESUMO

Os aços inoxidáveis austeníticos são amplamente utilizados em diversos setores industriais, devido às suas excelentes propriedades mecânicas e à elevada resistência à corrosão. A presença de cromo e níquel na composição química desses aços é essencial para garantir tais características, favorecendo uma estrutura austenítica em temperatura ambiente. Porém, o alto teor de cromo, aliado à exposição a temperaturas elevadas, favorece a precipitação de carbonetos ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) na microestrutura, um fenômeno conhecido como sensitização. O aço inoxidável austenítico QN1803, desenvolvido com baixo teor de níquel, com o objetivo de ter um custo menor e com propriedades semelhantes às dos aços convencionais dessa classe, também está suscetível a esse fenômeno. Neste estudo, foi analisado o grau de sensitização (GDS) do aço QN1803 após tratamento térmico por diferentes tempos de exposição (1, 6 e 24 horas). Para isso, foi utilizada a técnica de reativação eletroquímica potenciodinâmica de ciclo duplo (DL-EPR) em soluções de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5M + KSCN 0,01M, e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5M +  $\text{NH}_4\text{SCN}$  0,01M, por apresentar vantagens na análise de aços inoxidáveis com nitrogênio. Além disso, foram realizadas análises de potencial de circuito aberto, polarização potenciodinâmica linear e espectroscopia de impedância eletroquímica em solução de NaCl 3,5%. Os resultados indicaram que o aumento do grau de sensitização do material após tratamento térmico resultou em uma redução significativa da resistência e da qualidade do filme passivo, enfatizando o aumento da precipitação de carbonetos com o aumento dos tempos de tratamento. Além disso, houve o diferencial de se utilizar o meio  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5M +  $\text{NH}_4\text{SCN}$  0,01M no método DL-EPR, caracterizado por menores variações nos valores de GDS, mostrando-se mais apropriada para o estudo.

**Palavras-chave:** Aço inoxidável austenítico; Baixo teor de níquel; QN1803; Sensitização.

## ABSTRACT

Austenitic stainless steels are widely used in various industrial sectors due to their excellent mechanical properties and high corrosion resistance. The presence of chromium and nickel in the chemical composition of these steels is essential to ensure these characteristics, favoring an austenitic structure at room temperature. However, the high chromium content, combined with exposure to high temperatures, favors the precipitation of carbides ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) in the microstructure, a phenomenon known as sensitization. Austenitic stainless steel QN1803, developed with low nickel content in order to reduce costs and with properties similar to those of conventional steels in this class, is also susceptible to this phenomenon. In this study, the degree of sensitization (DOS) of QN1803 steel was analyzed after heat treatment for different exposure times (1, 6, and 24 hours). For this purpose, the double-cycle potentiodynamic electrochemical reactivation (DL-EPR) technique was used in solutions of  $0.5\text{M H}_2\text{SO}_4 + 0.01\text{M KSCN}$  and  $0.5\text{M H}_2\text{SO}_4 + 0.01\text{M NH}_4\text{SCN}$ , as it offers advantages in the analysis of stainless steels containing nitrogen. In addition, open circuit potential, linear potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy analyses were performed in a 3.5% NaCl solution. The results indicated that the increase in the degree of sensitization of the material after heat treatment resulted in a significant reduction in the resistance and quality of the passive film, emphasizing the increase in carbide precipitation with increasing treatment times. In addition, there was a difference in using the  $0.5\text{M H}_2\text{SO}_4 + 0.01\text{M NH}_4\text{SCN}$  medium in the DL-EPR method, characterized by smaller variations in DOS values, proving to be more appropriate for the study.

**Keywords:** Austenitic stainless steel; Low nickel content; QN1803; Sensitization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Classes de aços inoxidáveis classificados em relação aos percentuais de cromo e níquel .....	19
Figura 2	– Ilustração esquemática do processo de sensibilização em aços inoxidáveis.....	21
Figura 3	– Representação do comportamento padrão para uma curva de polarização potenciodinâmica linear .....	23
Figura 4	– Representação do método DL-EPR para avaliação do grau de sensibilização ..	25
Figura 5	– Diagrama de fases do aço QN1803 através da plataforma ThermoCalc .....	27
Figura 6	– Esquema de uma célula eletroquímica de três eletrodos .....	30
Figura 7	– Diagrama de Schaeffler-Delong com indicação da microestrutura predominante do aço QN1803 .....	32
Figura 8	– Micrografias ópticas das condições dos tratamentos térmicos do aço QN1803 com aumento de 20x: a) S <sub>0</sub> ; b) S <sub>1</sub> ; c) S <sub>2</sub> ; d) S <sub>3</sub> .....	33
Figura 9	– Curvas de monitoramento de potencial de circuito aberto dos tratamentos térmicos do aço QN1803 .....	35
Figura 10	– Curvas de polarização potenciodinâmica linear dos tratamentos térmicos do aço QN1803 .....	36
Figura 11	– Micrografias ópticas após polarização das condições dos tratamentos térmicos do aço QN1803 com aumento de 20x: a) S <sub>0</sub> ; b) S <sub>1</sub> ; c) S <sub>2</sub> ; d) S <sub>3</sub> .....	38
Figura 12	– Diagrama de Nyquist para as condições de tratamento térmico para o aço QN1803 .....	39
Figura 13	– Diagramas de Bode Módulo e Bode Fase, respectivamente, das condições de tratamento térmico do aço QN1803 .....	40
Figura 14	– Representação do método DL-EPR para as condições de tratamento térmico do aço QN1803 em: a) H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,5M + KSCN 0,01M e b) H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,5M + NH <sub>4</sub> SCN 0,01M .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço QN1803 .....	26
Tabela 2 – Tratamentos térmicos dos corpos de prova do aço QN1803 .....	28
Tabela 3 – Valores de cromo e níquel equivalentes do aço QN1803 .....	32
Tabela 4 – Valores medidos de dureza Rockwell B para as condições do aço QN1803 .....	34
Tabela 5 – Valores de monitoramento de potencial de circuito aberto dos tratamentos térmicos do aço QN1803 .....	35
Tabela 6 – Valores de potencial de quebra de passivação dos tratamentos térmicos do aço QN1803.....	37
Tabela 7 – Grau de sensibilização obtido através dos dados do método DL-EPR .....	42

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society of Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
LACAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
LEM	Laboratório de Ensaio Mecânicos
LPC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PIB	Produto Interno Bruto
UNS	Unified Numbering System

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	16
2.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	16
2.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	16
3	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
3.1	<b>Corrosão</b> .....	17
3.2	<b>Aços Inoxidáveis</b> .....	17
3.3	<b>Aços Inoxidáveis Austeníticos</b> .....	19
3.3.1	<i>Aço Inoxidável Austenítico QN1803</i> .....	20
3.4	<b>Corrosão em Aços Inoxidáveis Austeníticos</b> .....	20
3.5	<b>Ensaio Eletroquímico</b> .....	21
3.5.1	<i>Potencial de Circuito Aberto</i> .....	21
3.5.2	<i>Polarização Potenciodinâmica Linear</i> .....	22
3.5.3	<i>Espectroscopia de Impedância Eletroquímica</i> .....	23
3.5.4	<i>Método DL-EPR</i> .....	24
4	<b>MATERIAIS</b> .....	26
5	<b>METODOLOGIA</b> .....	28
5.1	<b>Tratamentos Térmicos</b> .....	28
5.2	<b>Caracterização Microestrutural e Mecânica</b> .....	28
5.3	<b>Ensaio Eletroquímico</b> .....	29
5.3.1	<i>Polarização Potenciodinâmica Linear</i> .....	30
5.3.2	<i>Espectroscopia de Impedância Eletroquímica</i> .....	30
5.3.3	<i>Método DL-EPR</i> .....	30
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	32
6.1	<b>Caracterização Microestrutural e Mecânica</b> .....	32
6.2	<b>Potencial de Circuito Aberto</b> .....	34
6.3	<b>Polarização Potenciodinâmica Linear</b> .....	35
6.4	<b>Espectroscopia de Impedância Eletroquímica</b> .....	38
6.5	<b>Método DL-EPR</b> .....	41
7	<b>CONCLUSÃO</b> .....	44
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	45

## 1 INTRODUÇÃO

A corrosão é considerada como um fenômeno espontâneo de degradação dos materiais, resultando em danos estruturais, riscos de acidentes e elevados impactos financeiros. Em termos econômicos, estima-se que aproximadamente 4,5% das receitas das nações industrializadas sejam gastas na prevenção da corrosão e na manutenção ou substituição de produtos afetados com este processo (Intel Market Research, 2025).

Dentre os materiais existentes, os aços figuram entre os mais suscetíveis a esse fenômeno, o que impulsiona a humanidade a buscar continuamente medidas de proteção que aumentem a vida útil das estruturas. Esse cenário também motiva o desenvolvimento de novas ligas capazes de substituir as originais, oferecendo maior resistência à corrosão sem comprometer o desempenho operacional nem suas propriedades (Callister Jr; Rethwisch, 2016).

Os aços carbono e de baixa liga, por serem amplamente utilizados, sofrem intensamente o ataque corrosivo, o qual exige a adoção de medidas de proteção. Os aços inoxidáveis representam uma alternativa para esse problema, devido a presença de cromo em sua composição, na qual forma-se uma película protetora, que separa o metal-base do meio corrosivo e, conseqüentemente, confere alta resistência à corrosão do material (Chiaverini, 2005).

Contudo, além da alta resistência à corrosão, as propriedades de tenacidade, resistência mecânica e dureza também os tornam adequado para aplicação em ambientes altamente agressivos, englobando desde a indústria petroquímica até a construção civil, os quais apresentam ambientes de alta salinidade, meios alcalinos ou ácidos e de temperatura elevada ou criogênica (Sheets, 2013).

Dentre eles, os aços inoxidáveis austeníticos são os mais utilizados devido a ter uma resistência à corrosão excelente, elevada tenacidade e boa soldabilidade. Isso se deve principalmente à introdução de níquel, cuja função é estabilizar a fase austenítica e retardar a formação de fase ferrítica, resultando uma melhora na resistência à corrosão sob tensão (Silva, 2021).

A demanda global de níquel tem apresentado um aumento de preços junto com a alta escassez do insumo principalmente devido ao aumento das indústrias de aços inoxidáveis e da produção de veículos elétricos e baterias recarregáveis (Mudd; Jowitt, 2022). A redução desta matéria prima pode contribuir significativamente para a proteção ambiental, visto que a extração e o beneficiamento do níquel envolvem elevado consumo de energia, juntamente

com a fabricação destes materiais. Portanto, a redução do emprego do níquel na produção de ligas e componentes industriais proporciona tanto vantagens econômicas quanto ambientais.

Como uma alternativa para tal problemática, o aço inoxidável austenítico QN1803 foi projetado para possuir teor de níquel menor que 3% em sua composição, relativamente baixo comparado aos aços convencionais dessa classe, como o aço UNS30700. A fim de manter a estrutura austenítica, os teores de manganês e nitrogênio são de 5% e 0,2%, respectivamente. Em comparação, estes teores são superiores ao aço UNS30700, com composição de 2% e 0,1% (Jiang *et al.* 2020).

Entretanto, nos aços inoxidáveis austeníticos tradicionais, um dos principais fenômenos que afeta o desempenho de tais materiais em serviço é a sensitização, que ocorre devido à precipitação de carbonetos de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) nos contornos de grão durante exposições a temperaturas intermediárias, na faixa de 450°C a 800°C. Esse processo reduz de forma localizada o teor de cromo, comprometendo a integridade da formação do filme passivo, tornando o material suscetível à corrosão intergranular. Autores como Davis (1994), Fontana (2005) e Sedriks (1996), reforçam a relevância do mecanismo da resistência a sensitização para durabilidade dos aços inoxidáveis, dependendo de fatores como composição química, teores de cromo e níquel, além do histórico de tratamentos térmicos.

Devido ao aço QN1803 apresentar uma microestrutura austenítica obtida através do aumento dos teores de manganês e nitrogênio, surge a necessidade de compreender como esses elementos influenciam no comportamento frente à sensitização. Segundo Solomon (1982) e Lo *et al.* (2009), estudos sobre aços austeníticos de baixo níquel ou alto manganês e nitrogênio indicam que alterações na composição química podem modificar tanto a cinética de precipitação de carbonetos quanto a estabilidade da fase austenítica. Portanto, o objetivo de investigar a suscetibilidade à sensitização através de tratamentos térmicos com altas faixas de temperaturas em tempos distintos, e em ambientes corrosivos no aço QN1803, tornou-se essencial neste trabalho, a fim de verificar como as propriedades de resistência à corrosão podem afetar a integridade deste material e como tais resultados podem contribuir em sua utilização industrial.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência à corrosão do aço inoxidável austenítico QN1803 após tratamento de sensitização em diferentes tempos exposto a ambientes com altos teores de íons cloreto.

### 2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a microestrutura do aço QN1803 antes e após os tratamentos de sensitização por microscopia ótica (MO);
- Avaliar a propriedade de dureza da liga após tratamentos térmicos por meio da técnica Rockwell B;
- Avaliar a resistência à corrosão do aço inoxidável austenítico QN1803 submetido a tratamentos térmicos de sensitização em solução NaCl 3,5%, por meio de técnicas eletroquímicas de potencial de circuito aberto (OCP), polarização potenciodinâmica linear e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS);
- Avaliar o grau de sensitização do material submetido a diferentes tempos de tratamento térmico, por meio da técnica de reativação eletroquímica potenciocinética em duplo-loop (DL-EPR);
- Avaliar o efeito do meio eletrolítico nos resultados para a técnica de DL-EPR, comparando as soluções 0,5M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,01M KSCN (de acordo com a ISO 12732:2006) e 0,5M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,01M NH<sub>4</sub>SCN.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Corrosão

A corrosão é um processo espontâneo que se manifesta na superfície dos metais por meio de reações químicas ou eletroquímicas, nas quais há a transferência de elétrons motivada pela diferença de potencial entre o metal e o meio eletrolítico. Tais reações, quando acontecem na interface metal/eletrolito em um circuito fechado, o metal libera elétrons ao ser oxidado, enquanto outra espécie química atua como aceitadora desses elétrons na etapa de redução, completando o processo corrosivo (Gentil, 1996; Panossian, 1993).

As perdas econômicas associadas à corrosão são expressivas e significativas para a sociedade. Segundo um relatório elaborado pela *Association for Materials Protection and Performance* em 2025, o custo global foi estimado em 2,5 trilhões de dólares, equivalendo a 3,4% do PIB mundial em 2013. Tal relatório aponta que o uso apropriado de métodos de controle e prevenção da corrosão, o custo das perdas pode ser reduzido em até 35% (Koch *et al.*, 2016).

Portanto, o processo da corrosão é prejudicial por comprometer a integridade estrutural, funcional e econômica, e por isso deve ser controlada. Compreender seus fundamentos é necessário para averiguar mecanismos de corrosão, como também prevenir através de meios adequados de proteção e no desenvolvimento de ligas que possuam a capacidade de suportar ambientes agressivos em longas exposições (Cramer *et al.*, 2003).

#### 3.2 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro-carbono altamente resistentes à corrosão, que possuem em sua composição, no mínimo, 10,5% de cromo. Esse elemento é responsável pela formação de um filme passivo protetor, com capacidade de autorreparo, evidenciando a importância da utilização deste tipo de aço. Outros elementos de liga, como molibdênio, manganês, titânio e silício, são frequentemente utilizados para aprimorar suas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão (Silva, 2021; Sheets, 2013).

O efeito do cromo nos aços inoxidáveis está associado à formação de uma fina camada de óxido de cromo, na qual se adere à superfície do material, protegendo o metal do meio corrosivo. Essa película apresenta as características como baixa volatilidade, alta resistividade elétrica e um difícil transporte de íons metálicos, contribuindo significativamente na proteção do material (Paredes, 2020).

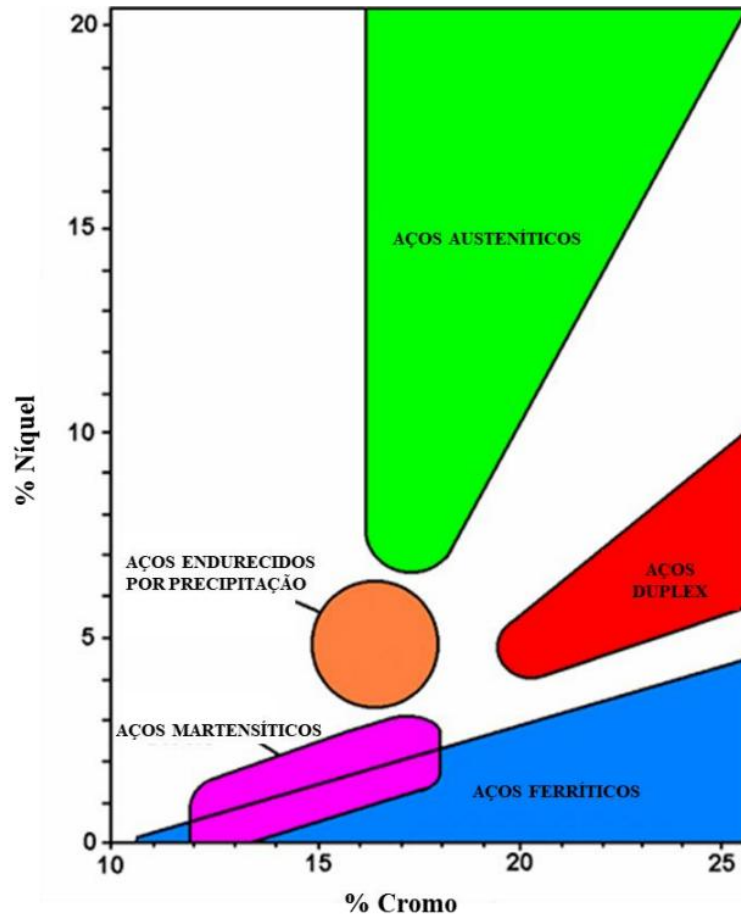
Além do cromo, a presença de níquel é de grande importância na composição de aços inoxidáveis convencionais. Esse elemento contribui não apenas para o aumento da

resistência à corrosão, como também é utilizado para a estabilização da fase austenítica ( $\gamma$ ), contrabalanceando o efeito ferritizante do cromo. Dessa forma, o níquel reduz a transformação da austenita em ferrita ( $\alpha$ ) à temperatura ambiente, retardando essa transformação de fase (Bhadeshia; Honeycombe, 2017).

Em comparação aos aços carbono convencionais, os aços inoxidáveis apresentam elevada dureza, resistência mecânica e principalmente, alta resistência à corrosão. Em razão dessas características, estes tipos de aço são costumeiramente utilizados em diversos setores industriais desde a construção civil até a indústria petroquímica, onde problemas de corrosão relacionados aos efeitos da salinidade marinha e à ação de substâncias agressivas podem ser minimizados pelo uso desses aços (Sheets, 2013).

Apesar de apresentarem propriedades superiores às dos aços carbono, os aços inoxidáveis podem ser classificados de acordo com sua microestrutura predominante, a qual é diretamente influenciada pela composição química e por tratamentos térmicos aplicados. Essa classificação é essencial para a adequada seleção da classe de aços inoxidáveis em função das exigências específicas de cada aplicação. De acordo com a Figura 1, identificam-se as regiões correspondentes às diferentes classes de aço inoxidável definidas pela relação entre os teores de cromo (Cr) e níquel (Ni) em sua composição. Essas classes incluem os aços ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex e endurecidos por precipitação (Sheets, 2013).

Figura 1: Classes de aços inoxidáveis classificados em relação aos percentuais de cromo e níquel.



Fonte: Linhares, 2024.

### 3.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais comuns entre as classes de aços inoxidáveis e caracterizam-se por excelente resistência à corrosão, elevada soldabilidade, além de alta ductilidade e tenacidade. Essas características se devem às elevadas concentrações de níquel e cromo em sua composição, que atuam na estabilização da estrutura austenítica. Essa microestrutura os tornam interessantes tanto para aplicações criogênicas quanto para aplicações em elevadas temperaturas (Silva, 2021; Aperam, 2015).

A composição dos aços inoxidáveis austeníticos são caracterizados por teores de cromo e de níquel na faixa de 15 a 26% e de 5 a 37%, respectivamente. Além desses elementos, têm-se ligantes adicionais, como nitrogênio e manganês, que geralmente são utilizados como estabilizantes da fase austenítica, em substituição parcial ao níquel. O molibdênio, porém, é frequentemente adicionado a fim de aprimorar a resistência à corrosão localizada, especialmente à corrosão por pites (Carbó, 2008; Padilha; Rios, 2002).

### 3.3.1 Aço Inoxidável Austenítico QN1803

O aço inoxidável austenítico QN1803 é caracterizado pelo baixo teor de níquel, com valores inferiores a 3,5%. Esse teor reduzido é compensado pelo acréscimo de manganês e nitrogênio, em proporções aproximadas de 5% e 0,2%, respectivamente. Estes acréscimos atuam como substitutos parciais do níquel na estabilização da fase austenítica, permitindo a manutenção da microestrutura desejada (Jiang *et al.*, 2020).

A adição de manganês contribui para a formação da fase austenítica e para o aumento da solubilidade de nitrogênio (N) no aço. Contudo, sua presença é associada com a redução da resistência à corrosão por pites, em função da formação de inclusões de sulfeto de manganês (MnS), que atuam como sítios preferenciais para a nucleação desse tipo de corrosão localizada (Pardo *et al.*, 2008; Stewart; Williams, 1993).

O nitrogênio, além de ser um elemento estabilizador da austenita, apresenta solubilidade limitada na matriz do aço. Quando dissolvido, este promove o aumento da resistência à corrosão por pites e à corrosão por frestas em meios com alta concentração de íons cloreto. Essa característica se deve à formação de íons  $\text{NH}_4^+$  dissolvidos, contribuindo para as reações de oxidação e para a estabilização do filme passivo, prevenindo de ataques de íons  $\text{Cl}^-$ . Além disso, a presença desses íons auxilia na estabilização da densidade de corrente, favorecendo a resistência à iniciação de pites (Baba; Kodama; Katada, 2002).

Dessa forma, o aço QN1803 foi desenvolvido como alternativa aos aços inoxidáveis austeníticos convencionais, como o UNS S30400, que apresenta valores de níquel superiores a 8% e enfrenta desafios com relação à escassez desse elemento (Jiang *et al.*, 2020). Em razão da menor concentração do teor de níquel, sua produção pode resultar em uma redução de até 20% nos custos em comparação ao aço 304, mantendo ou até superando propriedades como tenacidade, ductilidade, resistência mecânica e resistência à corrosão em ambientes ácidos (Zhou *et al.*, 2020).

### 3.4 Corrosão em Aços Inoxidáveis Austeníticos

Apesar dos aços inoxidáveis apresentarem elevada resistência à corrosão comparados às demais classes de aços, estes materiais podem tornar-se suscetíveis a esse processo natural e espontâneo. Tal comportamento está associado à possibilidade de falhas na proteção proveniente do filme passivo, especialmente em ambientes altamente agressivos, o que compromete a capacidade de passivação do material (Borgioli, 2023).

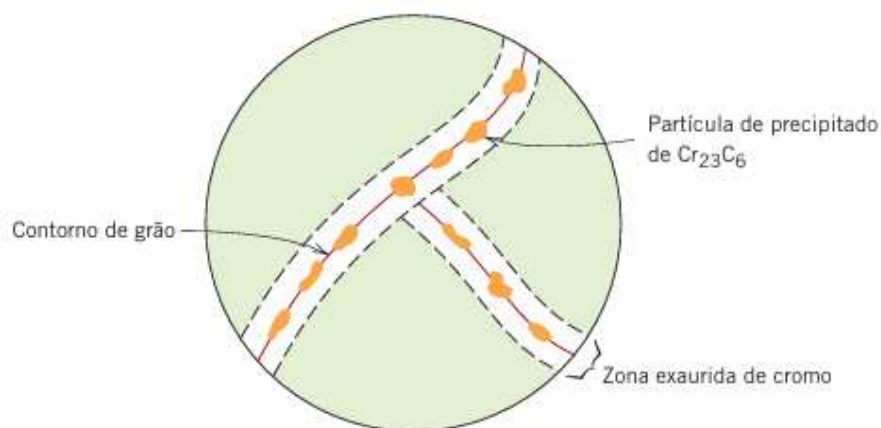
Como consequência, mecanismos de corrosão localizada, como a corrosão por pites e a corrosão por frestas, tornam-se mais frequentes, prejudicando a integridade estrutural

do aço. A presença de íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) constitui uma das principais causas da intensificação desse tipo de ataque em aços inoxidáveis (Wang *et al.*, 2020). Ademais, no caso dos aços inoxidáveis austeníticos, observa-se ainda a suscetibilidade à corrosão intergranular aos quais esses materiais podem ser submetidos.

A sensitização é um destes processos, o qual ocorre em aços inoxidáveis austeníticos quando estes são submetidos a temperaturas elevadas, geralmente na faixa de 400 °C a 800 °C, por períodos prolongados. Como consequência, ocorre a precipitação de carbonetos de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ), preferencialmente nos contornos de grão, resultando no empobrecimento de cromo nas regiões adjacentes a esses precipitados. Essa redução local do teor de cromo compromete a formação do filme passivo, tornando tais regiões mais suscetíveis à corrosão (Borgioli, 2023, Lima *et al.*, 2005).

Na Figura 2, é ilustrado o mecanismo de sensitização, no qual a difusão do carbono promove a formação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, levando à depleção de cromo nas zonas adjacentes e aumentando significativamente sua suscetibilidade à corrosão. Esse fenômeno representa um dos principais desafios na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos, uma vez que as regiões próximas à zona afetada pelo calor tornam-se propensas ao desenvolvimento de corrosão intergranular (Oliveira, 2023; Callister, 2016).

Figura 2: Ilustração esquemática do processo de sensitização em aços inoxidáveis.



Fonte: Callister, 2016

### 3.5 Ensaios Eletroquímicos

#### 3.5.1 Potencial de Circuito Aberto

O potencial de circuito aberto (OCP) é um método eletroquímico não destrutivo que permite avaliar o comportamento eletroquímico de um material, refletindo o equilíbrio do meio aquoso entre as reações anódicas e catódicas na interface metal/eletrólito. Esse método

observa a tendência do sistema em atingir um estado de equilíbrio dinâmico, caracterizado pelo estabelecimento de um potencial quase estacionário, por meio da medição entre o eletrodo de trabalho e um eletrodo de referência, na ausência de corrente externa aplicada.

As variações do potencial ao longo do tempo refletem os processos eletroquímicos que ocorrem na interface metal/eletrólito, estando associadas às reações de oxidação e redução do sistema, com a formação ou manutenção de uma camada protetora na superfície, na qual pode atuar como barreira à progressão dos mecanismos corrosivos (Bard; Faulkner; White, 2022; Jimenez *et al.*, 2009).

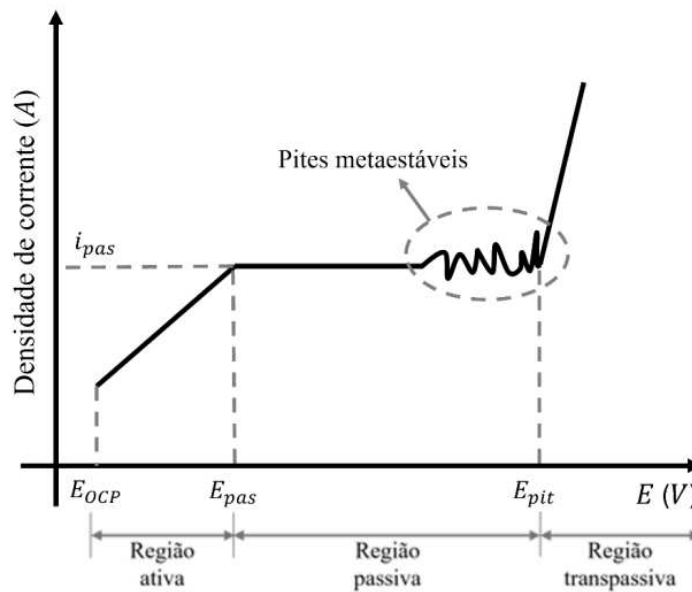
### 3.5.2 Polarização Potenciodinâmica Linear

A polarização potenciodinâmica linear é uma técnica eletroquímica utilizada para avaliar a cinética das reações de corrosão por meio do deslocamento controlado do potencial de equilíbrio do sistema. Esse deslocamento promove o transporte de elétrons, que pode ocorrer da superfície metálica para o eletrólito, caracterizando a polarização anódica, ou do eletrólito para a superfície metálica, caracterizando a polarização catódica. A diferença entre o potencial aplicado ao sistema e o potencial de equilíbrio resulta no sobrepotencial, o qual assume valores positivos quando associado à polarização anódica e valores negativos quando associado à polarização catódica.

Esta técnica avalia a taxa de corrosão a partir da medição da resistência à polarização, de forma não-destrutiva, baseada em uma mudança contínua no potencial do eletrodo (Kouřil; Novák; Bojko, 2006). A polarização é uma das técnicas mais aplicadas ao estudo da corrosão, devido a rapidez e elevada reprodutibilidade, associadas com a comodidade e facilidade da interpretação de dados característicos. (Queiroz, 2014; Alves *et al.*, 2012).

A Figura 3 representa a ilustração do comportamento padrão para uma curva de polarização linear, na qual são destacadas variáveis eletroquímicas relevantes. O  $E_{OCP}$  representa o potencial apresentado ao final da técnica de OCP, o  $i_{pas}$  e o  $E_{pas}$  apresentam os pontos de transição das regiões ativa e passiva, com a densidade de corrente e o potencial de passivação, e o  $i_{pit}$  e  $E_{pit}$  representam a separação das regiões de passivação e tranpassivação, sendo o  $E_{pit}$  identificado como o potencial no qual ocorre à quebra do filme passivo, evidenciada por um aumento abrupto e irreversível da densidade de corrente com a ampliação do potencial aplicado. Esse comportamento indica o processo de corrosão por pite.

Figura 3: Representação do comportamento padrão para uma curva de polarização potenciodinâmica linear



Fonte: Linhares, 2024

Durante o processo, pode ocorrer a propagação de pites metaestáveis, causada por um aumento momentâneo na densidade de corrente seguidos de sua redução, indicando a ocorrência de repassivação do filme protetor, sendo um comportamento comum observado em aços inoxidáveis (Linhares, 2024).

### 3.5.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) é uma técnica não-destrutiva amplamente empregada na caracterização de sistemas eletroquímicos, sendo usada para investigar a dinâmica de cargas na interface metal/eletrólito. Essa técnica possibilita o estudo do comportamento global do sistema, considerando diferentes processos eletroquímicos em diferentes velocidades, fornecendo informações com relação a resistência à polarização (Diógenes, 2019; Ribeiro; Abrantes, 2016).

A interpretação das medidas de EIS é principalmente realizada no domínio da frequência, por meio da correlação de elementos de um circuito elétrico equivalente (resistência, capacitância e indutância), analisando a resposta do sistema a uma perturbação de corrente alternada. Dessa forma, a técnica fornece informações sobre os mecanismos envolvidos nos processos de corrosão, a presença de filmes superficiais, espécies adsorvidas e a cinética das reações corrosivas (Ribeiro; Abrantes, 2016; Montemor; Simões; Ferreira, 2003).

A resposta na qual a técnica de EIS pode se apresentar é através dos diagramas de Nyquist e de Bode. O diagrama de Nyquist é constituído em uma série de pontos que correlacionam a seção real ( $Z'$ ) com a seção imaginária ( $Z''$ ), resultando em um vetor de módulo  $|Z|$  e um ângulo de fase ( $\theta$ ) em relação ao eixo real, formando um semicírculo. O diâmetro do semicírculo representa a resistência à transferência de carga, adotando uma menor suscetibilidade à corrosão para valores superiores de resistência. Entretanto, a interpretação dos dados se torna complexa em situações com grandes dispersões dos valores experimentais (Ribeiro; Abrantes, 2016).

Como alternativa, o diagrama de Bode é utilizado para facilitar a interpretação dos dados fornecidos pelo diagrama de Nyquist. Este gráfico é dividido entre Bode Módulo e Bode Fase, relacionando o logaritmo da frequência ( $\log f$ ) em Hertz, com o logaritmo do módulo da impedância ( $\log |Z|$ ), em Ohms, e o ângulo de fase, em graus. É possível determinar através do Bode Módulo a resistência à polarização em baixas frequências e a resistência do eletrólito em altas frequências. Já o Bode Fase permite avaliar o comportamento capacitivo do material ao medir o ângulo de fase, uma vez que um capacitor ideal apresenta um ângulo atingindo o máximo próximo de  $90^\circ$  (Ribeiro; Abrantes, 2016; Li *et al.*, 2015).

### 3.5.4 Método DL-EPR

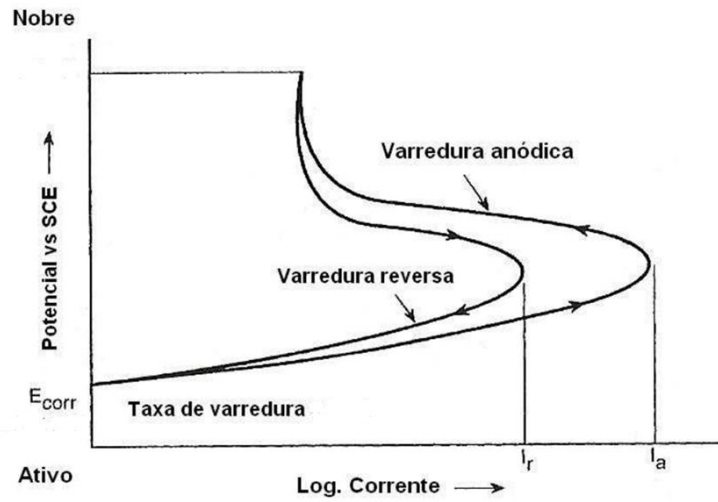
O método de reativação eletroquímica potenciocinética de duplo ciclo (DL-EPR) é uma técnica utilizada para avaliar o comportamento da formação do filme passivo e a suscetibilidade à corrosão intergranular, associada ao fenômeno de sensitização em aços inoxidáveis. Por meio da análise dos valores de densidade de corrente, é possível quantificar as regiões afetadas pelo empobrecimento de cromo na fronteira grão/contorno de grão, determinando o grau de sensitização do material (Aydogdu; Aydinol, 2006; ISO, 2006).

No ensaio de duplo ciclo, o metal inicialmente é polarizado anodicamente a partir do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) até atingir o potencial de passivação, promovendo a formação de uma camada passiva na superfície do aço, etapa denominada de ciclo de anodização. Em seguida, ocorre o processo de varredura reversa do potencial, reduzido-o até valores próximos do potencial de corrosão. Durante essa etapa, ocorre a quebra do filme passivo em regiões empobrecidas de cromo, correspondendo ao ciclo de reativação (Aydogdu; Aydinol, 2006).

A Figura 4 ilustra esquematicamente o ensaio de DL-EPR, evidenciando os dois ciclos eletroquímicos, as densidades de corrente máximas de anodização ( $I_a$ ) e de reativação ( $I_r$ ), bem como o potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ). A razão entre as densidades máximas de

corrente ( $I_r/I_a$ ) é utilizada como parâmetro quantitativo para determinar o grau de sensitização do material, sendo valores mais elevados indicativos de maior suscetibilidade à corrosão intergranular (Aydogdu; Aydinol, 2006).

Figura 4: Representação do método DL-EPR para avaliação do grau de sensitização.



Fonte: Adaptado de Palacio, 2008

#### 4 MATERIAIS

Neste estudo, foi utilizado o aço QN1803 como material de análise. O material foi recebido em formato de placa e, posteriormente, cortado em corpos de prova em tamanho de 10 mm x 10 mm, adequado para futuras análises, utilizando uma cortadora metalográfica do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC).

A espessura das peças do aço QN1803 possuem por volta de 2 mm, não sendo alteradas durante o trabalho, a fim de preservar as características microestruturais do material. Devido à limitações operacionais do equipamento de espectroscopia de emissão óptica para análise da composição química, os dados referentes ao aço QN1803 foram fornecidos pelo certificado de qualidade emitido pelo fabricante e confirmados por um analisador portátil por fluorescência de raios X (XRF), modelo Olympus Vanta VCR, para metais disponível no LPC, conforme apresentado na Tabela 1.

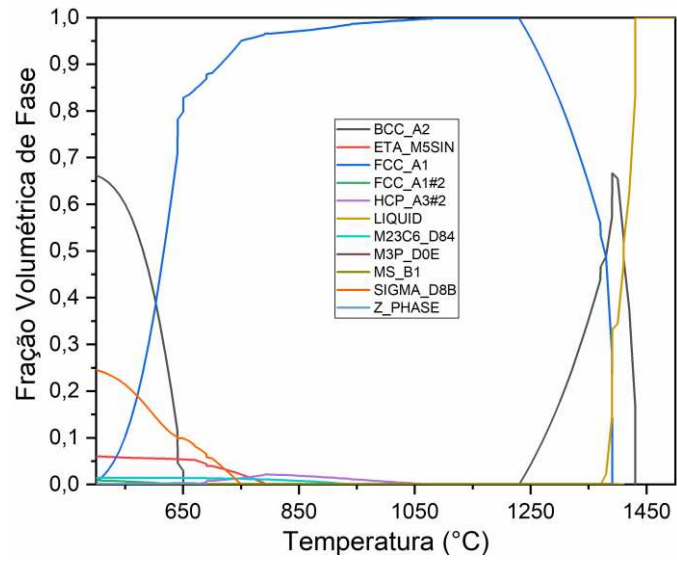
Tabela 1: Composição química do aço QN1803.

Aço	%C	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%N	%Fe
QN1803	0,08	5,55	18,10	3,38	0,10	1,06	0,23	Bal.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A partir da composição química do aço QN1803, foi elaborado o diagrama de fases da liga por meio da plataforma ThermoCalc, no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM), com o objetivo de estabelecer a temperatura adequada de austenitização para a realização do tratamento térmico de solubilização dos corpos de prova. A Figura 5 apresenta o diagrama de fases obtido, no qual foi estabelecido a temperatura de 1.100°C como condição para o tratamento de solubilização.

Figura 5: Diagrama de fases do aço QN1803 através da plataforma ThermoCalc



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos foram feitos em um forno mufla, modelo EDG 3000, no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC). As amostras foram tratadas isotermicamente a  $1.100^{\circ}\text{C}$  por 30 minutos, com o objetivo de promover dissolução de possíveis precipitados, aliviar tensões residuais e homogeneizar completamente a microestrutura na fase austenítica. Tal procedimento visa garantir que todas as amostras estejam em condições microestruturais equivalentes, minimizando tratamentos térmicos prévios desconhecidos que influenciem os resultados experimentais (Silva, 2021).

Após o tratamento de solubilização, os corpos de prova foram divididos em quatro condições experimentais. A primeira condição abrangeu somente as amostras solubilizadas. As três condições restantes foram submetidas ao tratamento de sensitização, à  $700^{\circ}\text{C}$ , com tempos diferentes de exposição térmica: 1 hora, 6 horas e 24 horas, respectivamente. Todas as amostras, ao final de cada tratamento térmico, foram resfriadas em água, a fim de assegurar as características microestruturais obtidas e interromper processos difusivos. A Tabela 2 representa a divisão das condições de tratamento térmico entre solubilizadas e sensitizadas.

Tabela 2: Tratamentos térmicos dos corpos de prova do aço QN1803.

Amostras	Tratamentos Térmicos
S <sub>0</sub>	$1100^{\circ}\text{C}$
S <sub>1</sub>	$1100^{\circ}\text{C} + 700^{\circ}\text{C}$ por 1h
S <sub>2</sub>	$1100^{\circ}\text{C} + 700^{\circ}\text{C}$ por 6h
S <sub>3</sub>	$1100^{\circ}\text{C} + 700^{\circ}\text{C}$ por 24h

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

### 5.2 Caracterização Microestrutural e Mecânica

Para a realização da caracterização microestrutural dos materiais, as amostras foram embutidas a frio em resina epóxi. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos a um processo de lixamento com lixas d'água em granulometrias 220, 300, 400, 600 e 1200, respectivamente, seguido de polimento mecânico utilizando panos de polimento e pastas de diamante com granulometrias de  $6\ \mu\text{m}$ ,  $3\ \mu\text{m}$  e  $1\ \mu\text{m}$ .

Com o objetivo de evidenciar a microestrutura cristalina dos aços inoxidáveis austeníticos, foi realizado um ataque eletrolítico com reagente ácido oxálico 10%. O procedimento seguiu as diretrizes da norma ASTM E407 de 2015, que estabelece as práticas recomendadas para ataque metalográfico de metais e ligas. O ataque foi aplicado em imersão, em uma tensão fixa de 3V por 75 segundos. Ao final, as amostras foram limpas com álcool etílico e analisadas através de um microscópio óptico de platina invertida, modelo LEICA DMI3000 M, disponível no LPC.

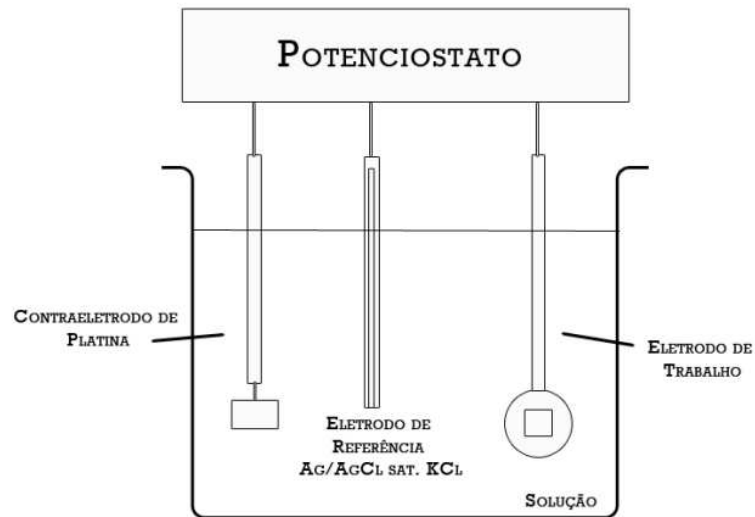
A propriedade mecânica analisada foi a dureza do aço tratado, avaliado por meio da medição da dureza Rockwell B, por um durômetro Rockwell Süssen, segundo norma ABNT 6508-1, feita no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) na Universidade Federal do Ceará. Esta medição consiste na medição da profundidade produzida por um indentador padronizado, sendo considerado menor em termos de dureza quanto maior for a profundidade de penetração.

Durante o ensaio, o indentador foi inicialmente pressionado contra a superfície da amostra com uma pré-carga aplicada, até atingir uma profundidade inicial de referência. Em seguida, uma carga adicional de ensaio de 100kNf foi aplicada em um período pré-estabelecido pela norma, até que o indentador atingisse sua profundidade máxima de penetração. Após a remoção da carga adicional, este retorna parcialmente, e a dureza é determinada com base na profundidade residual da indentação, cujo valor é calculado de acordo com a escala Rockwell utilizada, conforme estabelecido pela ISO 6508 (Associação Brasileira de Normas e Técnicas, 2019).

### **5.3 Ensaios Eletroquímicos**

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em triplicata para cada condição no Laboratório de Pesquisa em Corrosão, para garantir a reprodutibilidade dos dados. Todos os testes foram conduzidos em temperatura ambiente (25°C), em meio salino com NaCl 3,5% m/v, sendo somente o ensaio de DL-EPR feito utilizando duas soluções de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5M + KSCN 0,01M e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5M + NH<sub>4</sub>SCN 0,01M. A célula eletroquímica foi conectada a um potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT30 (Metrohm), operado pelo software Nova 2.1, ilustrado na Figura 6. O eletrodo de trabalho foi composto pelas amostras do aço QN1803 nas condições de tratamento térmico evidenciadas na Tabela 2, o contra-eletrodo de platina, abrangendo uma área maior que o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência Ag/AgCl sat.KCl.

Figura 6: Esquema de uma célula eletroquímica de três eletrodos.



Fonte: Adaptada de Queiroz, 2021.

### 5.3.1 Polarização Potenciodinâmica Linear

A polarização potenciodinâmica linear foi realizada após uma hora de monitoramento do OCP em temperatura ambiente. No ensaio, foi aplicada uma varredura contínua a uma taxa de 1 mV/s, iniciando no potencial de OCP e indo até 0,1V em relação ao OCP, com um critério de parada ao atingir valores de corrente de 1mA.

### 5.3.2 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica foi realizada no potencial de circuito aberto, após uma hora de monitoramento. O intervalo de frequência utilizado foi de 100 kHz a 0,006 Hz e com uma amplitude de 0,01V.

### 5.3.3 Método DL-EPR

O ensaio de DL-EPR foi utilizado em duas soluções eletrolíticas distintas para avaliação do grau de sensitização. A solução de  $H_2SO_4$  0,5M +  $KSCN$  0,01M foi estabelecida conforme norma ISO 12732, de 2006, sendo tradicionalmente utilizada para avaliação de ligas da série 304. Já a solução de  $H_2SO_4$  0,5M +  $NH_4SCN$  0,01M foi adotada por apresentar vantagens na análise de aços inoxidáveis austeníticos com nitrogênio, uma vez que o  $NH_4SCN$  favorece a ativação eletroquímica (He *et al.*, 2023).

A técnica foi realizada após 30 minutos do monitoramento de OCP. Ao iniciar, foi aplicado um potencial de varredura de 0,2V abaixo do OCP até 0,3V acima do OCP, representando o ciclo de anodização. Em seguida, o potencial foi revertido até o valor inicial do ensaio, representando o ciclo de reativação, em uma taxa de varredura de 1mV/s. Os valores obtidos de densidade de corrente máxima em ambos os ciclos foram utilizados para

determinação do grau de sensitização em cada condição de tratamento térmico do aço QN1803.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização Microestrutural e Mecânica

A determinação da microestrutura dos aços inoxidáveis pode ser indicada a partir do diagrama de Schaeffler-Delong, na qual estabelece a microestrutura predominante a partir dos dados de cromo equivalente ( $Cr_{eq}$ ), indicador da formação de fase ferrita, e de níquel equivalente ( $Ni_{eq}$ ), indicador da formação de fase austenita (Silva, 2021). O cálculo é feito através das Equações 1 e 2, com a fração mássica de cada elemento (Jiang *et al.*, 2020).

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

$$\%Ni_{eq} = [Ni] + [Co] + 30([C] + [N]) + 0,5[Mn] + 0,3[Cu] \quad (2)$$

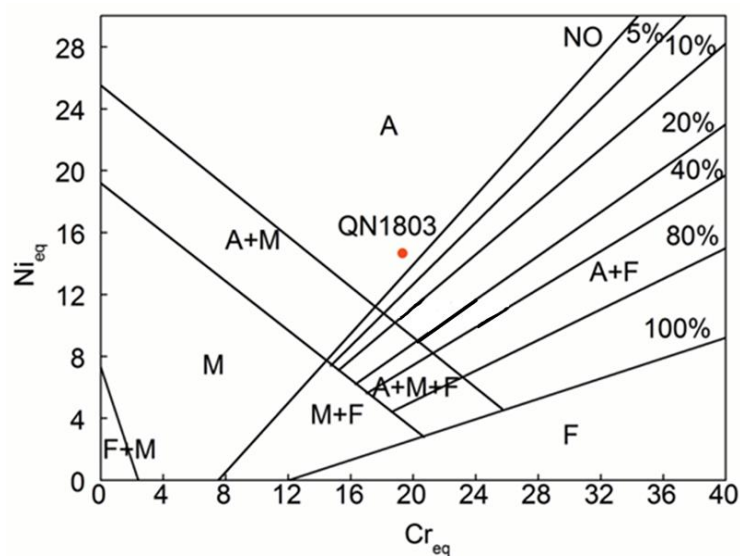
Ao calcular os valores de  $Cr_{eq}$  e  $Ni_{eq}$ , na Tabela 2, o aço QN1803 apresentou valores de cromo equivalente de 18,6% e valores de níquel equivalente de 15,8%. As coordenadas para o aço QN1803 demonstram uma tendência a apresentar uma microestrutura austenítica monofásica, conforme indicado no diagrama de Schaeffler-Delong, na Figura 7.

Tabela 3: Valores de cromo e níquel equivalentes do aço QN1803.

Aço	% $Cr_{eq}$	% $Ni_{eq}$
QN1803	18,6	15,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 7: Diagrama de Schaeffler-Delong com indicação da microestrutura predominante do aço QN1803.



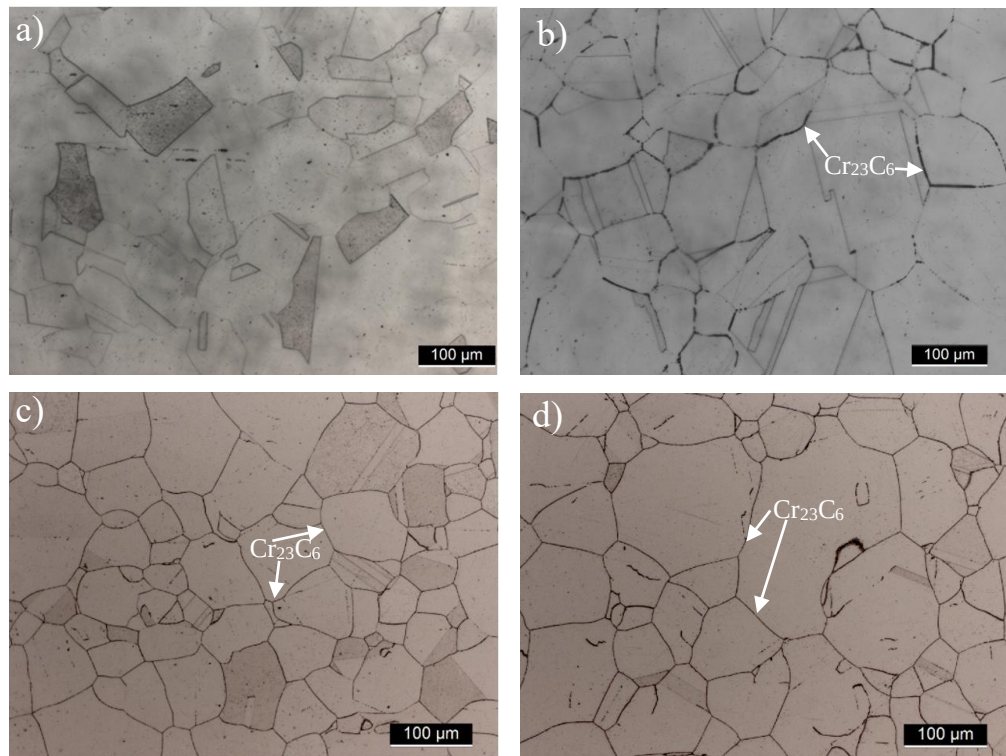
Fonte: Adaptado de Jiang *et al.*, 2020.

A Figura 8 apresenta as micrografias do material após a preparação metalográfica e o ataque eletrolítico, após ser submetido a tratamentos térmicos de solubilização e

sensitização. O ácido oxálico atacou predominantemente a região dos contornos de grão, fornecendo contraste para observação dos grãos.

As microestruturas apresentadas seguiram o padrão encontrado na literatura e confirmam a resposta dada pelo diagrama de Schaeffler-Delong, com predominância da fase austenita (He *et al.*, 2023). Cada micrografia se destacou pelos contornos de grão com tonalidade mais escura, escurecendo com o aumento do tempo de tratamento térmico de sensitização. Esse comportamento favorece a maior formação de precipitados de carbonetos e nitretos nos contornos, associada ao aumento das distorções de alto ângulo, que atuam como regiões de alta concentração de tensões acumuladas nas amostras (Silva, 2021; Cheng *et al.*, 2021).

Figura 8: Micrografias ópticas das condições dos tratamentos térmicos do aço QN1803 com aumento de 20x: a) S<sub>0</sub>; b) S<sub>1</sub>; c) S<sub>2</sub>; d) S<sub>3</sub>.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A fim de analisar os valores de dureza para dos aços analisados, estes são representados na Tabela 4, pelo método de Rockwell B. Os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 apresentam valores médios em torno de 80 HRB (Paredes, 2020). Embora não existam dados específicos na literatura referentes à dureza do aço QN1803 tratado termicamente, os valores medidos para as amostras sensitizadas se aproximaram do valor médio dos aços da série 300.

Houve um acréscimo de dureza das amostras sensibilizadas, sugerindo um aumento da precipitação dos carbonetos nos contornos de grão e uma melhoria das propriedades em comparação à condição  $S_0$ . Em contraponto, as amostras solubilizadas apresentaram valores menores que o padrão, comportamento que pode estar associado à dissolução de fases deletérias e precipitados na matriz austenítica (Silva, 2021).

Tabela 4: Valores medidos de dureza Rockwell B para as condições do aço QN1803.

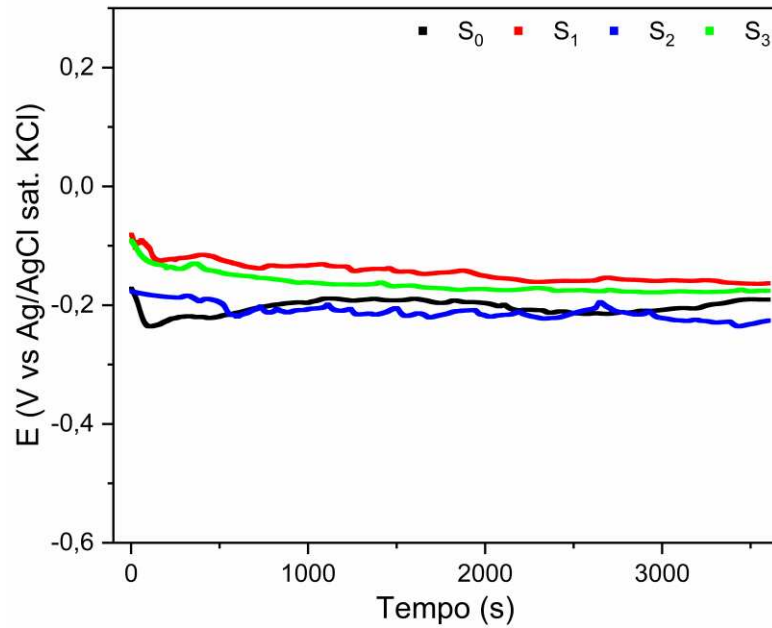
Amostras - Aço QN1803	
Condições	Dureza (HRB)
$S_0$	$48 \pm 1$
$S_1$	$73 \pm 1$
$S_2$	$81 \pm 1$
$S_3$	$77 \pm 1$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

## 6.2 Potencial de Circuito Aberto

O monitoramento de OCP para as condições de tratamento térmico do aço QN1803 em solução NaCl 3,5% são representados na Figura 9, após um período de 3600 segundos. Esta análise não é suficiente para detectar os efeitos do tratamento de sensibilização, logo, as curvas apresentam uma tendência de estabilização ao final do período. Com esse comportamento do ensaio, o tempo foi o suficiente para que as amostras atingissem um potencial estacionário, sob o meio de exposição.

Figura 9: Curvas de monitoramento de potencial de circuito aberto dos tratamentos térmicos do aço QN1803.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Analisa-se que os valores de potenciais de estabilização apresentaram valores próximos, segundo a Tabela 5. As condições dos tratamentos térmicos mantiveram-se constantes ao longo do monitoramento, indicando um processo de formação e crescimento da camada passiva até o alcance de uma espessura constante, caracterizando a estabilização do potencial (Linhares, 2024; Sheik *et al.*, 2022).

Tabela 5: Valores de monitoramento de potencial de circuito aberto dos tratamentos térmicos do aço QN1803.

Condições – Aço QN1803	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
E <sub>OCP</sub> (V vs Ag/AgCl sat. KCl)	-0,204 ± 0,011	-0,144 ± 0,016	-0,211 ± 0,013	-0,164 ± 0,016

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

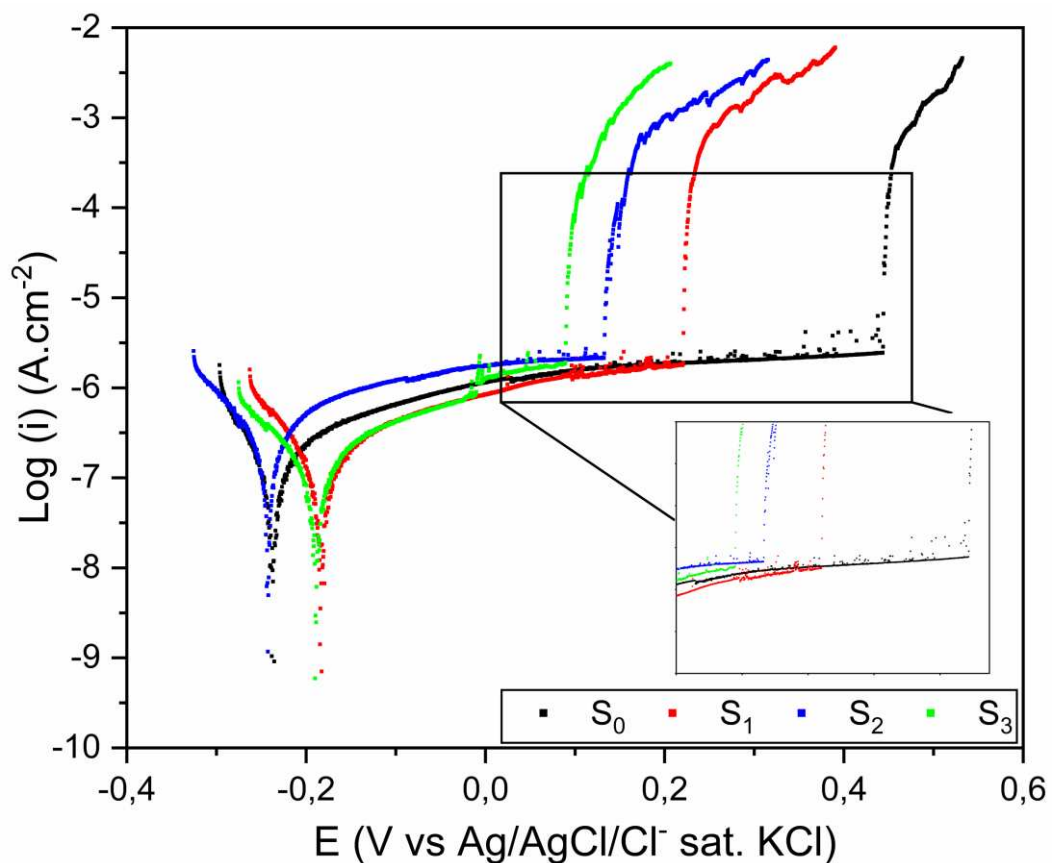
### 6.3 Polarização Potenciodinâmica Linear

Com o objetivo de analisar o comportamento dos materiais diante do processo corrosivo, foram desenvolvidas as curvas referentes ao ensaio de polarização potenciodinâmica linear dos tratamentos térmicos para o aço QN1803, partindo dos potenciais de OCP, evidenciados na Tabela 5. As curvas de polarização, obtidas em solução NaCl 3,5%, são representadas na Figura 10, representando o ramo catódico, associada as reações de

redução na superfície do eletrodo, e o ramo anódico, correspondente à atividade corrosiva (Sheik *et al.*, 2022).

A partir das curvas, são fornecidos os valores do potencial de passivação ( $E_{pas}$ ) e densidade de corrente de passivação ( $i_{pas}$ ) por meio da região linear correspondente à zona passiva, e do potencial de quebra de passivação ( $E_{pit}$ ), definido como o potencial necessário para a formação de pites.

Figura 10: Curvas de polarização potenciodinâmica linear dos tratamentos térmicos do aço QN1803.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Observa-se qualitativamente que todos os potenciais de corrosão possuem valores semelhantes entre si. Nas curvas de polarização, observa-se uma transição da região ativa para a passiva, evidenciada pela estabilidade da densidade de corrente com o aumento do potencial, traduzido como  $E_{pas}$ ; porém a transição da fase passiva para a transpassiva é caracterizada pelo aumento brusco da densidade de corrente, indicando a quebra do filme passivo (Ribeiro; Abrantes, 2016).

As condições de tratamento térmico do aço QN1803 a partir da Tabela 6, apresentaram valores divergentes do  $E_{\text{pit}}$ , com  $S_0$  apresentando a maior extensão da zona passiva, e em ordem decrescente,  $S_3$  como a menor região. Devido ao processo de sensibilização gerar zonas empobrecidas de cromo na matriz, afetando a capacidade de formação do filme passivo e sua integridade. A condição  $S_0$  apresentou maiores vantagens devido a sua ampla zona passiva e potenciais de quebra de passivação superiores às condições  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , indicando uma alta resistência do filme passivo. Além disso, é possível avaliar na Figura 10, a suscetibilidade da liga à formação de pites metaestáveis em todas as condições.

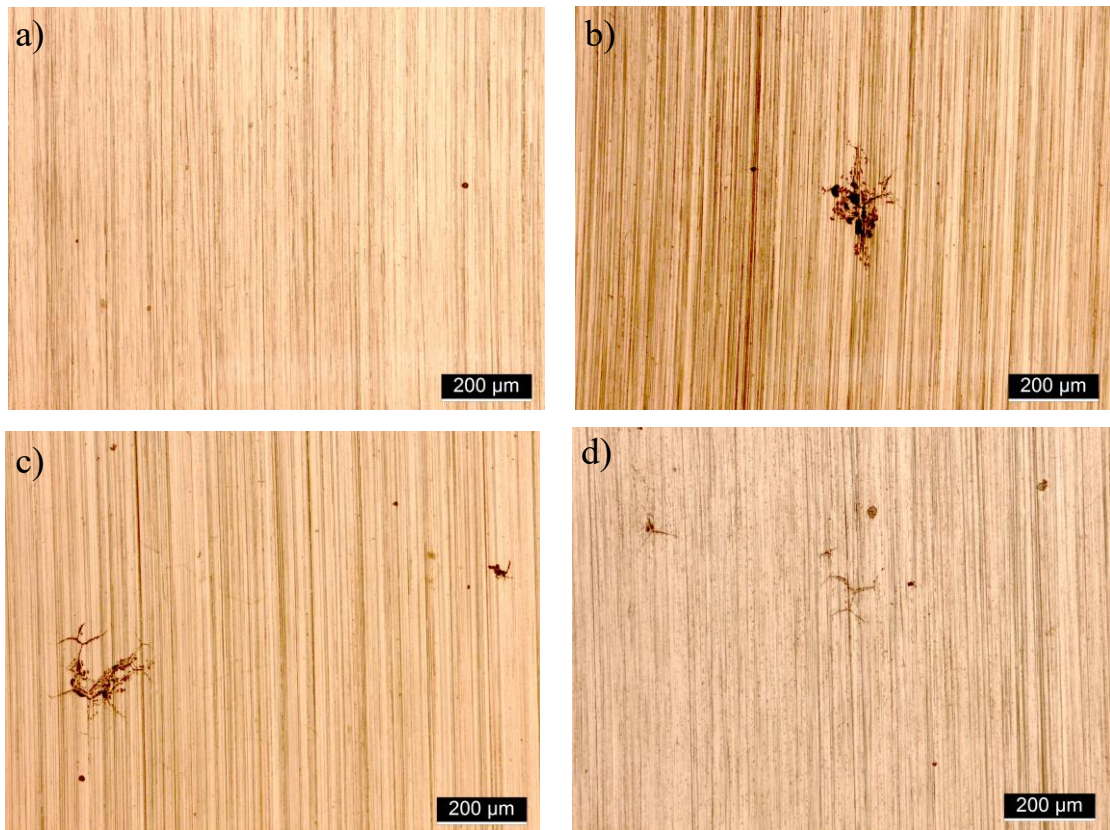
Tabela 6: Valores de potencial de quebra de passivação dos tratamentos térmicos do aço QN1803.

Condições – Aço QN1803	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
$E_{\text{pit}}$ (V vs Ag/AgCl sat. KCl)	$0,443 \pm 0,035$	$0,201 \pm 0,015$	$0,137 \pm 0,013$	$0,113 \pm 0,010$

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

A Figura 11 destaca as micrografias ópticas após os ensaios de polarização potenciodinâmica linear. Nas Figuras 11b, 11c e 11d, é possível observar a presença de ataques localizados, os quais evoluíram para um processo de corrosão intergranular, aumentando para cada tempo adotado no processo de sensibilização. Pode-se inferir que com o aumento deste período, as amostras apresentarão maiores quantidades de precipitações de carbonetos de cromo nos contornos, como é possível analisar na Figura 8, apresentando uma maior suscetibilidade à corrosão intergranular do material. Em comparação, a análise da condição  $S_0$ , na qual foi somente solubilizada, a presença de pites é praticamente imperceptível, sugerindo uma resistência superior à corrosão localizada. Isso destaca a qualidade do tratamento térmico aplicado e a importância deste, a fim de assegurar a resistência à corrosão do material.

Figura 11: Microscopias ópticas após polarização das condições de tratamento térmico do aço QN1803 com aumento de 10x.: a) S<sub>0</sub>; b) S<sub>1</sub>; c) S<sub>2</sub>; d) S<sub>3</sub>.

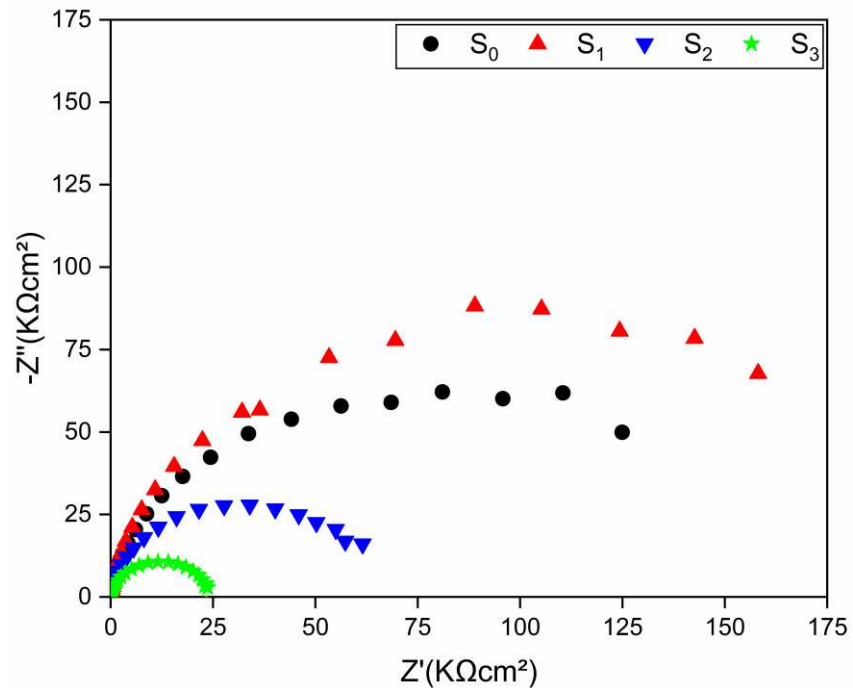


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

#### 6.4 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

O ensaio de impedância eletroquímica pode apresentar dois tipos de respostas, através do diagrama de Nyquist e do diagrama de Bode. A Figura 12 apresenta o diagrama de Nyquist em cada uma das condições de tratamento para o aço QN1803. As quatro condições apresentaram comportamentos iguais, com valores de impedância em ordens diferentes de grandeza.

Figura 12: Diagrama de Nyquist para as condições de tratamento térmico para o aço QN1803.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

As curvas apresentam um único e amplo semicírculo com comportamento capacitivo, característico para aços inoxidáveis. Este arco é associado a processos de transferência de carga entre a interface metal/eletrólito, sendo a propriedade de resistência à corrosão do material diretamente ligada ao diâmetro do semicírculo, determinada pela projeção da curva no eixo real ( $Z'$ ) (Ribeiro; Abrantes, 2016; Chaves *et al.*, 2006).

Através do gráfico é possível observar uma redução no tamanho do semicírculo para as condições de tratamento térmico de sensibilização, principalmente em  $S_2$  e  $S_3$ , em comparação às outras condições. Portanto, é possível inferir que há uma queda na resistência à corrosão dos materiais submetidos à sensibilização.

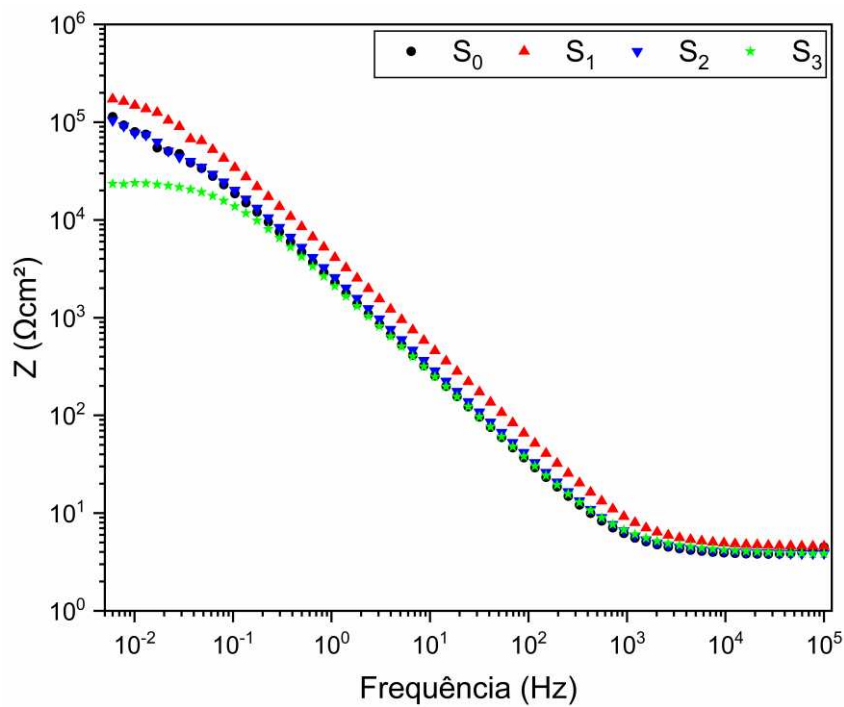
A Figura 13 apresenta os gráficos de Bode para as condições de tratamento térmico do aço QN1803 como uma segunda avaliação no ensaio de EIS. Os diagramas de Bode Módulo demonstraram valores semelhantes em todas as condições, exceto para a condição  $S_3$ , com destaque para os valores em baixas frequências, relacionadas a resistência à polarização.

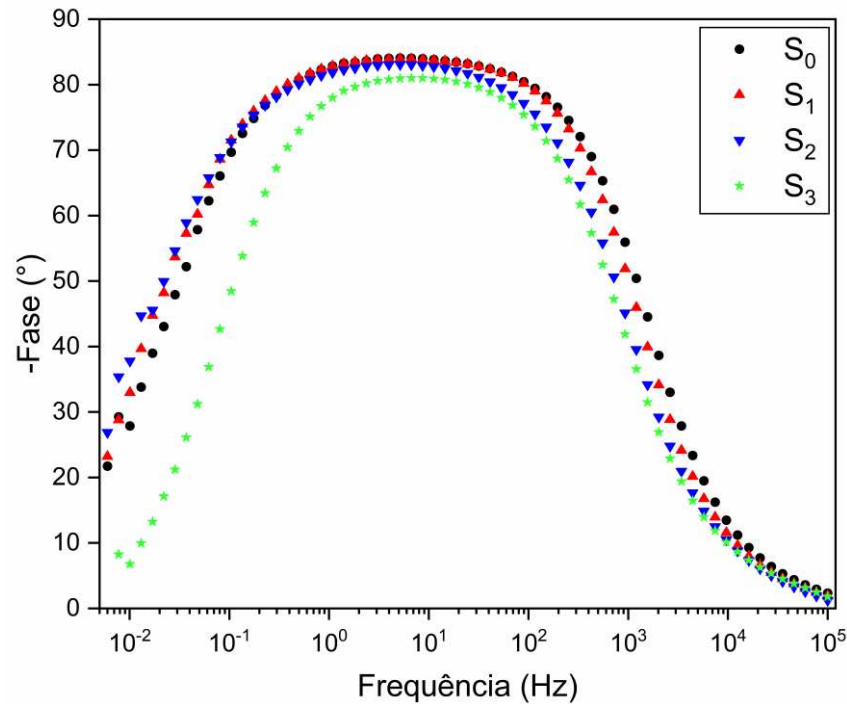
O diagrama de Bode Fase para todas as condições de tratamento térmico apresenta um pico na faixa de frequência média a baixa, em valores aproximados a  $-90^\circ$ . Porém, para a condição  $S_3$ , esta apresentou valores abaixo das demais, em faixas semelhantes de frequência.

Ângulos de fase próximos a  $-90^\circ$  indicam um comportamento capacitivo e sugerem uma excelente qualidade do filme passivo (Linhares, 2024).

Ao analisar ambos os diagramas de Bode, é possível observar que as condições  $S_0$ ,  $S_1$  e  $S_2$  apresentaram processos semelhantes, ao contrário da condição  $S_3$ . Logo, conclui-se que o comportamento capacitivo dos corpos de prova sensibilizados por 24 horas foi afetado, apresentando uma resistência à polarização e uma qualidade do filme passivo formado inferior aos demais tratamentos, sinalizando uma maior suscetibilidade a processos corrosivos.

Figura 13: Diagramas de Bode Módulo e Bode Fase, respectivamente, das condições de tratamento térmico do aço QN1803.





Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

### 6.5 Método DL-EPR

O método de reativação potenciocinética eletroquímica de duplo ciclo (DL-EPR) é apresentado na Figura 14, destacando os corpos de prova submetidos a diferentes tratamentos térmicos. Neste ensaio, dois meios foram analisados e correlacionados: a solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5M +  $\text{KSCN}$  0,01M, dada como padrão para determinação do grau de sensitização para o aço UNS30400, segundo ISO 12732:2006; e a solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5M +  $\text{NH}_4\text{SCN}$  0,01M, adequado para aços inoxidáveis austeníticos com a presença do nitrogênio (He *et al.*, 2023).

Ambos os reagentes  $\text{KSCN}$  e  $\text{NH}_4\text{SCN}$  atuam como reativadores do ensaio eletroquímico, tendo como função promover a quebra do filme passivo em regiões empobrecidas de cromo (Lopez, 1997). O ensaio permite confirmar a presença dessas zonas, as quais se manifestam como resposta na região de reativação da curva eletroquímica. Através dos dados obtidos, o grau de sensitização (GDS) é determinado pela razão entre o valor máximo de densidade de corrente obtido na região de reativação ( $I_r$ ) e o valor máximo de densidade de corrente na zona anódica ( $I_a$ ), expresso como  $I_r/I_a$ .

A Tabela 6 apresenta os valores de GDS calculados para cada eletrólito avaliado, considerando a variação do reagente reativador. Observa-se que, com o aumento dos tempos de sensitização, o GDS assume valores mais elevados, indicando uma maior suscetibilidade à

corrosão intergranular. De acordo com a literatura, valores de GDS inferiores a 1% são indicativos de elevada resistência à corrosão intergranular (He *et al.*, 2023).

Ao analisar a Tabela 6, as amostras submetidas apenas ao tratamento de solubilização apresentaram valores de GDS inferiores a 1%, corroborando com os dados fornecidos na literatura. Em contraponto, as amostras S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub> apresentaram valores de GDS superiores. Devido a isso, analisa-se que o aumento do tempo de tratamento térmico resultou no aumento da sensitização das amostras, denotando uma ampliação na precipitação de carbonetos, afetando as propriedades de resistência à corrosão do material. Ressalta-se, portanto, a importância do tratamento de solubilização como estratégia eficaz para a proteção do material frente a processos corrosivos.

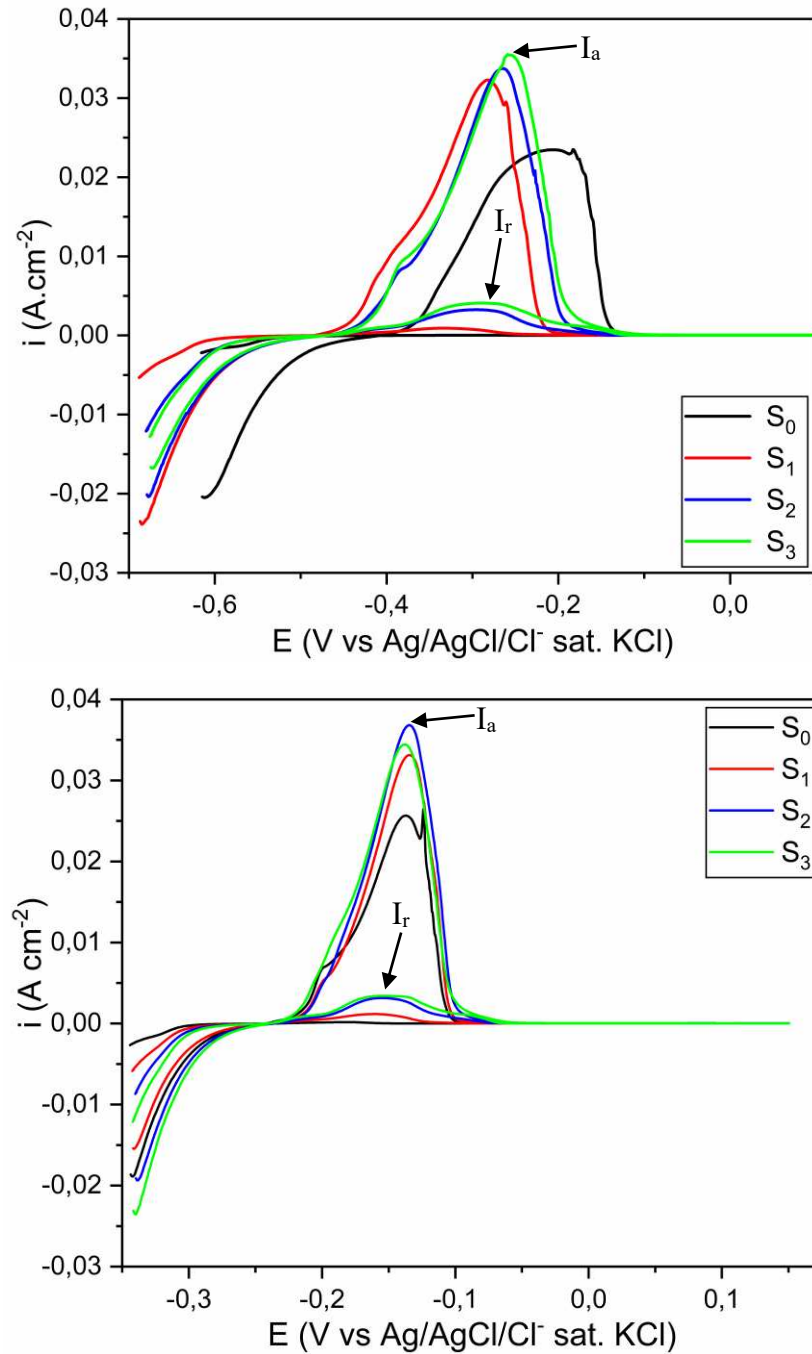
A análise comparativa dos eletrólitos a partir da Tabela 6 destaca que a solução H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5M + NH<sub>4</sub>SCN 0,01M apresentou uma menor sensibilidade de resposta ao ensaio, caracterizada por menores variações nos valores de GDS quando comparada à solução convencional H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5M + KSCN 0,01M. Apesar dos resultados obtidos, esta última permanece como uma alternativa consolidada para a avaliação de aços inoxidáveis contendo nitrogênio em sua composição, devido à sua ampla aplicação e validação na literatura.

Tabela 7: Grau de sensitização obtido através dos dados do método DL-EPR.

GDS – Aço QN1803	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,5M + KSCN 0,01M	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,5M + NH <sub>4</sub> SCN 0,01M
S <sub>0</sub>	0,44% ± 0,34	0,43% ± 0,16
S <sub>1</sub>	2,28% ± 0,86	2,29% ± 0,83
S <sub>2</sub>	9,06% ± 1,05	8,62% ± 0,95
S <sub>3</sub>	13,6% ± 1,73	9,64% ± 0,20

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 14: Representação do método DL-EPR para as condições de tratamento térmico do aço QN1803 em: a)  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5M +  $\text{KSCN}$  0,01M e b)  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5M +  $\text{NH}_4\text{SCN}$  0,01M.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

## 7 CONCLUSÃO

- O aço QN1803 apresentou características microestruturais e de dureza para as condições de tratamento térmico no qual foram submetidas, evidenciando o aumento da precipitação de carbonetos acompanhando o tempo de sensitização.
- O ensaio eletroquímico de polarização potenciodinâmica linear demonstrou que a capacidade de passivação das amostras sensitizadas foram afetadas, ocasionando em uma falha na resistência de um filme passivo estável, causada pela criação de zonas empobrecidas de cromo.
- O ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica demonstrou que a resistência à polarização do material foi comprometida para o tratamento de sensitização no tempo de 24 horas, indicando a queda na resistência à corrosão do material e na qualidade do filme passivo.
- O método DL-EPR determinou que a medição do grau de sensitização (GDS) possibilitou a quantificação do quanto o corpo de prova está sensitizado. Amostras submetidas ao tratamento de sensitização apresentaram valores superiores, sugerindo a tendência à ocorrência de processos de corrosão intergranular associados às regiões deficientes em cromo com o aumento do período de tratamento.
- A análise comparativa dos eletrólitos destacou que a solução  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5M +  $\text{NH}_4\text{SCN}$  0,01M apresentou uma menor sensibilidade de resposta ao ensaio, caracterizada por menores variações nos valores de GDS quando comparada à solução convencional  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5M +  $\text{KSCN}$  0,01M, mostrando-se mais apropriada para o estudo.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, H. G. *et al.* Aplicação da técnica de polarização linear para detectar corrosão em concreto armado atacados por SO<sub>4</sub> - e Cl<sup>-</sup>. **Revista de Química Industrial**, Rio de Janeiro, n. 736, p. 18-23, 2012.
- 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.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E407**: Practice for Microetching Metals and Alloys. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- APERAM. **Aço inoxidável**: a solução perfeita para o desenvolvimento sustentável. [S. l.: s. n.], 2015.
- ASSOCIATION FOR MATERIALS PROTECTION AND PERFORMANCE (AMPP). **Global Campaign Urges Action on \$2.5 Trillion Corrosion Crisis**. [S. l.]: AMPP, 22 abr. 2025.
- AYDOGDU, G. H.; AYDINOL, M. Determination of susceptibility to intergranular corrosion and electrochemical reactivation behaviour of AISI 316L type stainless steel. **Corrosion Science**, [S. l.], v. 48, n. 11, p. 3565-3583, nov. 2006.
- 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.
- BARD, Allen J.; FAULKNER, Larry R.; WHITE, Henry S. **Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2022.
- BORGIOLO, F. The Corrosion Behavior in Different Environments of Austenitic Stainless Steels Subjected to Thermochemical Surface Treatments at Low Temperatures: An Overview. **Metals**, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 776, 2023.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CARBÓ, Hector Mário. **Aços inoxidáveis**: aplicações e especificações. Belo Horizonte: ArcelorMittal Inox Brasil, 2008.
- 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.
- 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.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. ampl. e rev. São Paulo: ABM, 2005.

DAVIS, J. R. **ASM Specialty Handbook: Stainless Steels**. Materials Park: ASM International, 1994.

DIÓGENES, O. B. F. **Estudo da resistência à corrosão de superfícies metálicas recobertas com revestimento à base de lignina**. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

FONTANA, M. G. **Corrosion Engineering**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

GENTIL, V. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HE, P. *et al.* A different type of intergranular corrosion facilitated by hydrogen in austenitic stainless steel. **Corrosion Science**, [S. l.], v. 219, 111258, 2023.

INTEL MARKET RESEARCH. **Corrosion Management Program: CMP Market Outlook 2025-2032**. [S. l.]: Intel Market Research, 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12732**: Corrosion of metals and alloys — Electrochemical potentiokinetic reactivation measurement using the double loop method (based on Čihal's method). Geneva, 2006.

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

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

KOCH, G. *et al.* **International measures of prevention, application and economics of corrosion technologies study**. USA: NACE International, v. 15385, 2016.

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.

LIMA, A. *et al.* Sensitization evaluation of the austenitic stainless steel AISI 304L, 316L, 321 and 347. **Journal of Materials Science**, [S. l.], v. 40, p. 139–144, 2005.

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.

LOPEZ, N. *et al.* Application of double loop electrochemical potentiodynamic reactivation test to austenitic and duplex stainless steels. **Corrosion Science**, Oxford, v. 39, n. 4, p. 677–690, 1997.

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.

OLIVEIRA, F. N. **Efeito da sensitização na corrosão intergranular de aços inoxidáveis austenítico (ABNT 304) e ferrítico (ABNT 430) com e sem solda**. 2023. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

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.

PALACIO, F. O. **Efeito do tratamento térmico no grau de sensitização do aço inoxidável austenítico AISI 304, avaliado por método de reativação eletroquímica potenciodinâmica na versão ciclo duplo (DL-EPR)**. 2008. 44 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

PAREDES, R. S. C. **Aços inoxidáveis: metalurgia e soldabilidade**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2020. Texto do curso de "Metalurgia de Soldabilidade de Aços Inoxidáveis".

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.

QUEIROZ, M. B. **Estudo comparativo da corrosão em grades utilizadas em baterias de chumbo-ácido, formadas em processos de fundição e laminação**. 2014. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

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.

SEDRIKS, A. J. **Corrosion of Stainless Steels**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

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.

SILVA, André Luiz V. da Costa E.; MEI, Paulo R. **Aços e ligas especiais**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2021. *E-book*.

SOLOMON, H. D.; DEVINE, T. M. **Austenitic Stainless Steels**. Metals Park: American Society for Metals, 1982.

STEWART, J.; WILLIAMS, D. E. The initiation of pitting corrosion on austenitic stainless steel: on the role and importance of sulphide inclusions. **Corrosion Science**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 457-474, 1992.

WANG, Z. *et al.* Chloride-induced alterations of the passive film on 316L stainless steel and blocking effect of pre-passivation. **Electrochimica Acta**, [S. l.], v. 329, 135159, 2020.

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.