



Universidade Federal Fluminense

Pólo Universitário de Volta Redonda
Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

MÔNICA DOS SANTOS

**“O EFEITO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA DUREZA E
COMPORTAMENTO À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL
MARTENSÍTICO 410D”**

**UNIVERSIDADE
FEDERAL
FLUMINENSE**

VOLTA REDONDA

2023

MÔNICA DOS SANTOS

**“O EFEITO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA DUREZA E
COMPORTAMENTO À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO
410D”**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Área de Concentração: **Modelamento e Simulação de Processos e Fenômenos**

Linha de Pesquisa: **Microestrutura e Propriedades de Materiais**

ORIENTADOR: PROF. D. Sc. GLÁUCIO SOARES DA FONSECA

Volta Redonda

2023

Ficha catalográfica automática - SDC/BEM
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S237e Santos, Mônica dos
O efeito de tratamentos térmicos na dureza e comportamento à corrosão do aço inoxidável martensítico 410D / Mônica dos Santos. - 2023.
106 p.: il.

Orientador: Glaucio Soares da Fonseca.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda, Volta Redonda, 2023.

1. Modelamento e Simulação de Processos e Fenômenos. 2. Microestrutura e Propriedades de Materiais. 3. Tratamentos Térmicos. 4. Ensaio Eletroquímico. 5. Produção intelectual. I. Fonseca, Glaucio Soares da, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda. III. Título.

CDD - XXX

MÔNICA DOS SANTOS

**“O EFEITO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA DUREZA E
COMPORTAMENTO À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO
410D”**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em
Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal
Fluminense, como requisito para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Área de Concentração: **Modelamento e Simulação
de Processos e Fenômenos**

Linha de Pesquisa: **Microestrutura e
Propriedades de Materiais**

Aprovado em 29 de setembro de 2023

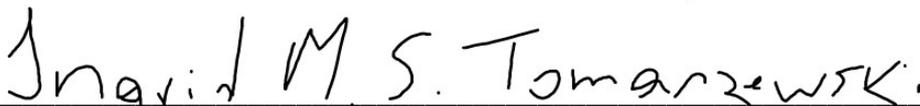
BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **GLAUCIO SOARES DA FONSECA**
Data: 19/10/2023 13:00:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. GLÁUCIO SOARES DA FONSECA, D. Sc. – Orientador

Documento assinado digitalmente
 **ELIVELTON ALVES FERREIRA**
Data: 17/10/2023 21:29:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. ELIVELTON ALVES FERREIRA, D. Sc.


Prof. INGRID MEIRELLES SALVINO TOMASZEWSKI, D. Sc.

Volta Redonda

2023

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, Nossa Senhora e aos
meus pais Eliana e Paulo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e Nossa Senhora que nunca me desampararam e sempre me guiaram e deram forças para seguir adiante para esse tão esperado momento. Agradeço com muita gratidão no coração.

Agradeço aos meus pais Eliana e Paulo que sempre me deram apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha trajetória acadêmica. Mesmo que de longe sempre estiveram presentes me mandando forças e me ajudando a seguir em frente.

Ao meu noivo Afonso, por sua compreensão em todos os meus momentos de ausência. Gratidão por todo suporte e por sempre estar ao meu lado e acreditar que eu poderia ir mais longe.

Ao meu irmão Michel que sempre se orgulhou, me acompanhou e acreditou que toda essa trajetória seria possível.

Aos professores D. Sc. Gláucio Soares da Fonseca e D. Sc. Elivelton Alvez Ferreira que me deram todo o suporte necessário, compartilharam conhecimentos e tiveram muito comprometimento em me ajudar com muita paciência e dedicação.

À Aperam South America pela doação de todo material do presente estudo.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade na participação e contribuições acerca do trabalho e à UFF pela disponibilização de recursos que garantiram a execução do trabalho.

Ao meu chefe Paulo Rodrigues que sempre me incentivou e me ajudou incondicionalmente com horários flexíveis para que esse projeto se tornasse realidade.

Aos meus queridos amigos, quero agradecer por todo apoio. Especialmente à minha amiga Isabella Ribeiro que diariamente me incentivava e sempre me fazia enxergar que seria possível esse sonho, muito obrigada. À Silvana Oliveira que foi minha parceira de análises e experimentos, minha gratidão por todo conhecimento e ajuda!

EPÍGRAFE

“Comece fazendo o que é necessário,
depois o que é possível, e de repente você
estará fazendo o impossível”

(São Francisco de Assis)

RESUMO

Os aços inoxidáveis são reconhecidos pela ampla aplicação em diferentes tipos de produtos e indústrias. O aço inoxidável também conhecido como uma liga metálica, geralmente é composto por dois ou mais elementos químicos. Sua utilização é tão ampla que podem-se deparar em itens de linha branca como talheres, geladeiras, fogões, cutelaria, mas também em instalações como bobinas, corrimão de escada, revestimentos de elevadores, em construções civis, automóveis e equipamentos náuticos. Esse amplo uso levou a estudos para melhorar cada vez mais suas propriedades. Dentre os aços inoxidáveis, estão os aços martensíticos que combinam alta resistência mecânica com moderada resistência à corrosão. O tratamento térmico para os aços inoxidáveis martensíticos são usados para aumento de dureza, tenacidade e melhoria na resistência mecânica. O presente trabalho consiste em trabalhar com o aço AISI 410D que tem aplicações típicas como: pás e outras peças de turbinas a vapor, peças de válvulas, eixos de bombas e material ferroviário. Esse trabalho mostra os efeitos dos processos de austenitização, têmpera e revenimento no aço martensítico AISI 410D, bem como os resultados de dureza e ensaios eletroquímicos em curvas de polarização e análise EDS para assim determinar os parâmetros dos processos para obter o aço com as melhores condições em termo de dureza e resistência à corrosão. Esse aço na indústria comumente não passa pelo tratamento de revenido, uma vez que os resultados não condizem com o esperado, gerando também um custo a mais. Esse fato se comprova no presente trabalho, onde o melhor resultado foi encontrado no valor de dureza de 404 HC e melhor resistência a corrosão na condição austenitizada a 1050°C por 30 minutos. Nessa mesma condição a distribuição de Cromo se manteve mais uniforme na matriz em comparação com outras amostras.

Palavras chave: Aço inoxidável martensítico 410D, tratamento térmico, corrosão, curva de polarização, distribuição de Cr.

ABSTRACT

Stainless steels are recognized for their wide application in different types of products and industries. Stainless steel, also known as a metallic alloy, is usually composed of two or more chemical elements. Its use is so wide that it can be found in white goods such as cutlery, refrigerators, stoves, cutlery, but also in installations such as coils, stair railings, elevator coatings, in civil construction, automobiles, and nautical equipment. This wide use led to studies to improve its properties more and more. Among the stainless steels are the martensitic steels, which combine high mechanical resistance with moderate corrosion resistance. The heat treatment for martensitic stainless steels are used to increase hardness, toughness and improvement in mechanical strength. The present work consists of working with AISI 410D steel that has typical applications such as: steam turbine blades and other parts, valve parts, pump shafts, and railroad material. This work shows the effects of austenitizing, quenching, and tempering processes on the martensitic AISI 410D steel, as well as the results of hardness and electrochemical tests in polarization curves and EDS analysis to determine the parameters of the processes to obtain the steel with the best conditions in terms of hardness and corrosion resistance. This steel in the industry commonly does not go through tempering treatment, since the results do not match what is expected, also generating an extra cost. This fact is confirmed in this work, where the best result was found in the hardness value of 404 HC and better corrosion resistance in the austenitized condition at 1050°C for 30 minutes. In this same condition, the chromium distribution was more uniform in the matrix when compared to other samples.

Keywords: Martensitic stainless steel 410D, heat treatment, corrosion, polarization curve, Cr distribution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fatores que afetam a escolha de um material.....	18
Figura 2 - Produção de Aço Inoxidável (toneladas).....	21
Figura 3 - Oxidação das ligas de acordo com a % de Cr.....	22
Figura 4 - Formação da camada passiva nos aços inoxidáveis.....	23
Figura 5 - Diagrama de Schaeffler.....	25
Figura 6 - Diagrama de fase Fe-Cr.....	26
Figura 7 - Representação das famílias dos aços inoxidáveis e suas classificações.....	27
Figura 8 - Representação da estrutura CFC (à esquerda) e após a deformação da rede em martensita, célula TCC (à direita).....	33
Figura 9 - Célula Unitária Tetragonal de Corpo Centrado (TCC).....	33
Figura 10 - Tipos de martensita formadas em uma liga Fe-C.....	34
Figura 11 - Exemplo de microestrutura martensítica característica vista pelo MEV: a) Martensita em ripas, b) Martensita Mista e c) martensita em placas.....	35
Figura 12 - Gráfico com esquema dos 3 tratamentos térmicos – Austenitização, Têmpera e Revenido.....	37
Figura 13 - Diagrama TTT.....	38
Figura 14 - Efeito da temperatura de revenido em um aço martensítico.....	42
Figura 15 - Ciclo dos Metais.....	43
Figura 16 - Célula Eletroquímica.....	45
Figura 17 - Principais formas de corrosão.....	46
Figura 18 - Micrografia com corrosão por pite em um aço inoxidável.....	48
Figura 19 - Diferentes tipos de morfologias de pites encontradas nos aços.....	48
Figura 20: Esquema de corrosão por pite de metal exposto a uma solução de NaCl.....	49
Figura 21 - Variação do potencial de corrosão (OCP) conforme a reação na qual é exposto o sistema: formação da película de óxido (à esquerda) e dissolução da película de óxido (à direita).....	49
Figura 22 - Curva de Polarização para o comportamento ativo-passivo.....	53
Figura 23 - Diagrama esquemático de Tafel.....	55
Figura 24 - Parâmetros de susceptibilidade à corrosão por pite em uma curva de polarização cíclica.....	56
Figura 25 - Representação da histerese negativa e positiva.....	57
Figura 26 - Fluxograma do trabalho desenvolvido.....	59

Figura 27 - Amostra como recebida.....	60
Figura 28 - Tratamentos Térmicos desenvolvidos.....	61
Figura 29 - Diagonais L1 e L2 do losango formado pelo ensaio de Microdureza Vickers.....	66
Figura 30 - Célula Eletroquímica.....	68
Figura 31 - Microestrutura da amostra CR –410D – aumento de 500x.....	72
Figura 32 - Comparação dos valores de Dureza (HC) em diferentes tempos e temperaturas.....	73
Figura 33 - Amostras austenitizadas e temperadas à 980°C (500x) – A) por 30 min, B) por 60 min, C) por 120 min.....	74
Figura 34 - Amostras austenitizadas e temperadas à 1015°C (500x) – A) por 30 min, B) por 60 min, C) por 120 min.....	75
Figura 35 - Amostras austenitizadas e temperadas à 1050°C (500x) – A) por 30 min, B) por 60 min, C) por 120 min.....	75
Figura 36 - Comparação dos valores de Dureza (HC) austenitizadas, temperadas e revenidas à 200°C.....	77
Figura 37 - Comparação dos valores de Dureza (HC) austenitizadas, temperadas e revenidas à 400°C.....	77
Figura 38 - Amostra austenitizada e temperada 1015°C por 60 min, revenida A) à 200°C e B) à 400°C.....	78
Figura 39 - Comparação dos valores de dureza HC das amostras sem revenido, com revenido à 200°C e à 400°C em temperaturas de a) 980°C b) 1015°C e c) 1050°C.....	78
Figura 40 - Curva de Polarização Cíclica aço 410D – amostra como recebida.....	80
Figura 41 - Fotomicrografia (MEV) de amostra como recebida com pites aparentes em 44x à esquerda e 500x à direita.....	81
Figura 42 - Curva de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas, temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de A) 980°C, B) 1015°C e C) 1050°C.....	81
Figura 43 - Fotomicrografia (MEV) da amostra austenitizada, temperada à 1050°C em 30 min a) 500 x, b) 2000 x.....	83
Figura 44 - Fotomicrografia (MEV) da amostra austenitizada, temperada à 1050°C em 120 min a) 500 x, b) 2000 x.....	83
Figura 45 - Curva de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas, temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de A) 980°C, B) 1015°C e C) 1050°C.....	84

Figura 46 - Curva de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas, temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de A) 980°C, B) 1015°C e C) 1050°C.....	85
Figura 47 - Fotomicrografia (MEV) da amostra austenitizada, temperada e revenida à 200°C em 1.00 Kx, a) à 1050°C em 60 min, b) à 1015°C em 60 min.....	86
Figura 48 - Distribuição de Cr nas amostras.....	87
Figura 49 - Fotomicrografia (MEV) da amostra austenitizada, temperada e revenida à 400°C em 500 x a) e 30 min b) 120 min.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos principais aços inoxidáveis austeníticos (% em peso).....	28
Tabela 2 - Composição química dos principais aços inoxidáveis ferríticos (% em peso).....	29
Tabela 3 - Composição química dos principais aços inoxidáveis duplex (% em peso) e valores de PREN.....	31
Tabela 4 - Principais aços inoxidáveis martensíticos e suas aplicações.....	31
Tabela 5 - Composição química dos principais aços inoxidáveis martensíticos (% em peso).....	36
Tabela 6 - Características da corrosão química e eletroquímica.....	44
Tabela 7 - Composição química do aço inoxidável martensítico AISI 410D.....	58
Tabela 8 - Tratamento de Austenitização e Têmpera nas amostras do aço 410D.....	62
Tabela 9 - Tratamento de Revenido do aço 410D.....	63
Tabela 10 - Parâmetros utilizados nos testes OCP e CP.....	69
Tabela 11 - Dureza Vickers (HV) do aço 410D.....	71
Tabela 12 - Dureza Vickers (HV) do aço 410D após passar por austenitização e têmpera	72
Tabela 13 - Dureza Vickers (HV) do aço 410D após passar por austenitização, têmpera e revenido à 200°C.....	76
Tabela 14 - Dureza Vickers (HV) do aço 410D após passar por austenitização, têmpera e revenido à 400°C.....	76
Tabela 15 - Dados obtidos do Gráfico de Polarização Cíclica aço 410D – amostra como recebida.....	80
Tabela 16 - Dados obtidos do Gráfico de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas e temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de 980°C, 1015°C e 1050°C.....	82
Tabela 17 - Dados obtidos do Gráfico de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas, temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de 980°C, 1015°C e 1050°C e revenidas à 200°C.....	84

Tabela 18 - Dados obtidos do Gráfico de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas, temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de 980°C, 1015°C e 1050°C e revenidas à 400°C.....	85
Tabela 19 - Fotomicrografia (MEV) das amostras pós ensaios de corrosão.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AISI - American Iron and Steel Institute

UFF - Universidade Federal Fluminense

EEIMVR - Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda

AI - Aço Inoxidável

Fe - Ferro

C - Carbono

Cr - Cromo

Ni - Níquel

N - Nitrogênio

Mn - Manganês

Mo - Molibdênio

Si – Silício

Ti – Titânio

Nb – Nióbio

Å - Angstrom

σ – Sigma

γ – Fase gama – Austenita

δ – Fase delta - ferrita

α – Fase alfa – Ferrita

AIF – Aços Inoxidáveis Ferríticos

PREN - Pitting Resistance Equivalent Number

AIM – Aços Inoxidáveis Martensíticos

ICZ - Instituto de Metais Não Ferrosos

E_{corr} – Potencial de corrosão

i_{corr} – Densidade de corrente de corrosão

I_{pass} – Densidade de passivação

E_{pite} – Potencial de pite

E_{pass} – Potencial de passivação

E_{prot} – Potencial de Proteção

CR – Como recebida

min – minutos

EDS - Energy Dispersive Spectrometry

Sumário

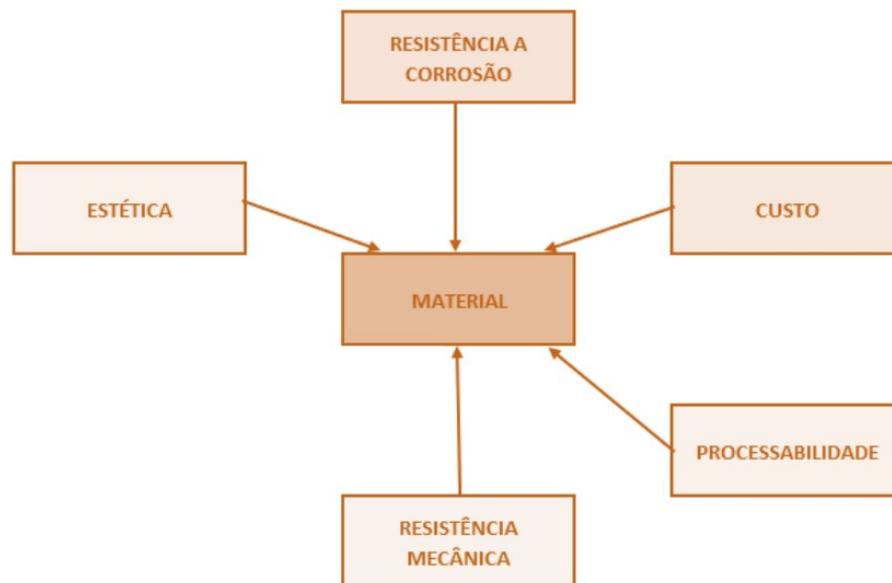
1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Aços Inoxidáveis	21
3.1.2	classificação dos Aços Inoxidáveis	26
3.1.2.1	Aços Inoxidáveis Austeníticos	27
3.1.2.2	Aços Inoxidáveis Ferríticos	29
3.1.2.3	Aços Inoxidáveis Duplex	30
3.1.2.4	Aços Inoxidáveis Martensíticos	31
3.2	Tratamentos Térmicos	36
3.2.1	Austenitização	37
3.2.1	Têmpera	39
3.2.1	Revenido	40
3.3	Corrosão	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	58
4.1	Material	58
4.1.1	Amostra como recebida	58
4.2	Métodos	59
4.2.1	Fluxograma do trabalho desenvolvido	59
4.2.2	Corpos de Prova	59
4.2.3	Tratamentos Térmicos	60
4.2.3.1	Austenitização e Têmpera	61
4.2.3.2	Revenido	62
4.2.4	Preparação metalográfica das amostras	63
4.2.4.1	Embutimento a quente	63
4.2.4.2	Lixamento e Polimento	63
4.2.4.3	Ataque	65
4.2.5	Microscopia ótica	65
4.2.6	Caracterização Mecânica	65
4.2.6.1	Ensaio de Dureza	65
4.2.6.2	Ensaio de Corrosão	66
4.2.6.3	Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV)	69
4.2.6.4	Microanálise EDS	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
5.1	Caracterização mecânica e microestrutural do material	71
5.1.1	Material como recebido	71
5.1.2	Material após Austenitização e Têmpera	72
5.1.3	Material após Austenitização, Têmpera e Revenido	76
5.2	Ensaio Eletroquímico	79

	5.2.1 Resistência à corrosão do Material como recebido	79
	5.2.2 Resistência à corrosão após Austenitização e Têmpera	81
	5.2.3 Resistência à corrosão após Revenimento.....	84
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	95
8	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Atualmente os aços estão presentes em todos os lugares e nos mais diversos setores. É um componente importante para o funcionamento da economia por meio do encadeamento de diversas cadeias produtivas e tendo em vista toda essa importância torna-se mais que necessário escolher um bom material para as mais diversas aplicações. Portanto, sabe-se que para a seleção de um bom material é necessário levar em consideração alguns fatores, como: resistência a corrosão, custo, processabilidade, resistência mecânica e estética, conforme Figura 1 (TRIPADALLI, CLAUDIA, 2011).

Figura 1 – Fatores que afetam a escolha de um material



Fonte: Adaptado de (TRIPADALLI, CLAUDIA, 2011)

Os aços inoxidáveis são importantes para a engenharia em função de suas propriedades mecânicas em temperaturas elevadas, pelas propriedades magnéticas, pela tenacidade de algumas ligas e por sua resistência à corrosão e oxidação. A microestrutura tem influência predominante no desempenho dos aços inoxidáveis, sendo dependente da composição química e do tratamento térmico ao qual o material possa ser submetido (COLPAERT, 2008).

São classificados como inoxidáveis os aços que possuem em sua composição química pelo menos 10 a 12 % de Cr. Geralmente essa concentração equivale ao mínimo necessário para assegurar uma razoável resistência à corrosão em contato com a atmosfera. Os aços

inoxidáveis estão divididos basicamente em aços austeníticos, martensíticos, ferríticos e duplex, e sua composição química é que irá definir a qual grupo um determinado aço inoxidável irá pertencer (MODENESI, 2001).

No presente trabalho, o estudo ocorre nos aços inoxidáveis martensíticos. Esses aços são amplamente utilizados por suas boas propriedades mecânicas e moderada resistência à corrosão. No entanto, a necessidade de propriedades superiores em aplicações específicas levou a extensas pesquisas destinadas a melhorar o desempenho desses aços (ISFAHANY et al., 2011).

A aplicação de tratamentos térmicos se faz necessária para aprimorar as propriedades mecânicas e químicas do metal. Os tratamentos mais comuns e os que serão mostrados no presente trabalho é a austenitização, têmpera e revenido.

A austenitização consiste na elevação da temperatura até o campo austenítico, onde se mantém por um tempo específico nessa temperatura e então é realizada a têmpera que tem como principal característica o resfriamento brusco e que concede ao metal alta dureza e elevada resistência a corrosão. Depois de temperados, os aços martensíticos passam pelo revenimento que altera a microestrutura e alivia as tensões geradas pela têmpera, tendo como principal objetivo recuperar a tenacidade e a ductilidade do metal (MARIANO, MUROLO, 2006).

A proposta desse trabalho consiste em realizar a austenitização, têmpera e revenido em diferentes faixas de temperaturas a fim de analisar como o aço se comporta nesses tratamentos. Logo após, a dureza foi medida em cada etapa dos tratamentos e o ensaio de corrosão foi realizado e analisado seu comportamento eletroquímico. A análise via EDS foi realizada a fim de verificar a distribuição de cromo nas amostras selecionadas. Após a realização dos ensaios e com os resultados, foi possível verificar o quão efetivo é o tratamento relacionado a dureza e resistência a corrosão do material.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é analisar as mudanças microestruturais e de resistência a corrosão do aço inoxidável martensítico AISI 410D, após o mesmo passar por tratamentos de austenitização, têmpera e revenido em diferentes faixas de temperaturas e tempos.

2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem por objetivos específicos conforme tópicos listados:

- Analisar os valores de dureza antes e após os tratamentos térmicos realizados;
- Analisar os efeitos dos tratamentos de austenitização e têmpera sobre a resistência à corrosão do aço inoxidável martensítico, em soluções de NaCl;
- Avaliar o efeito da temperatura e tempos de revenimento sobre a resistência à corrosão do aço inoxidável martensítico, em soluções de NaCl;
- Relacionar a ação dos tratamentos térmicos nos resultados obtidos nos ensaios de dureza e eletroquímicos;
- Analisar a distribuição de Cr com o auxílio da técnica EDS e relacioná-la com a resistência à corrosão;

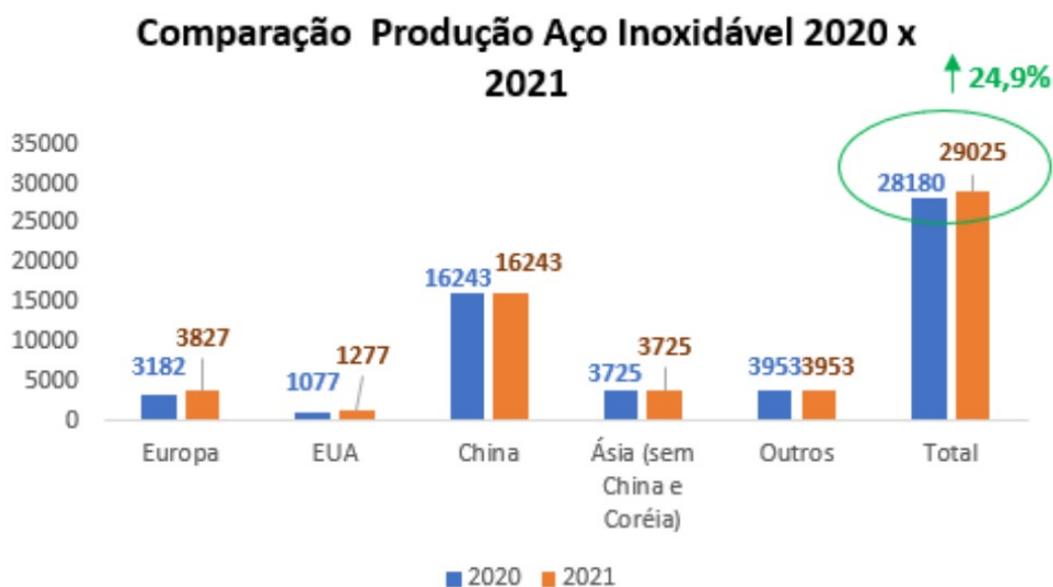
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica tem por meio apresentar os aços inoxidáveis em geral, os aços inoxidáveis martensíticos e descrever a composição química do aço AISI 410D, ao qual será demonstrado os tratamentos realizados e ensaios eletroquímicos nesse presente trabalho.

3.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são caracterizados por possuírem uma grande gama de utilização e segundo o ISSF (2021), a produção desse aço aumentou muito nos últimos anos. Um fator que contribui amplamente com esse aumento é a durabilidade apresentada nos diferentes tipos do material. Suas propriedades higiênicas e estéticas também fazem do aço inoxidável atrativo para diversos setores do mercado. Na Figura 2, pode-se observar o aumento significativo de 24,9% comparando 2020 e 2021 na produção do aço inoxidável no mundo.

Figura 2 – Produção de Aço Inoxidável (toneladas) mundialmente



Fonte: Adaptado de (ISSF, 2021)

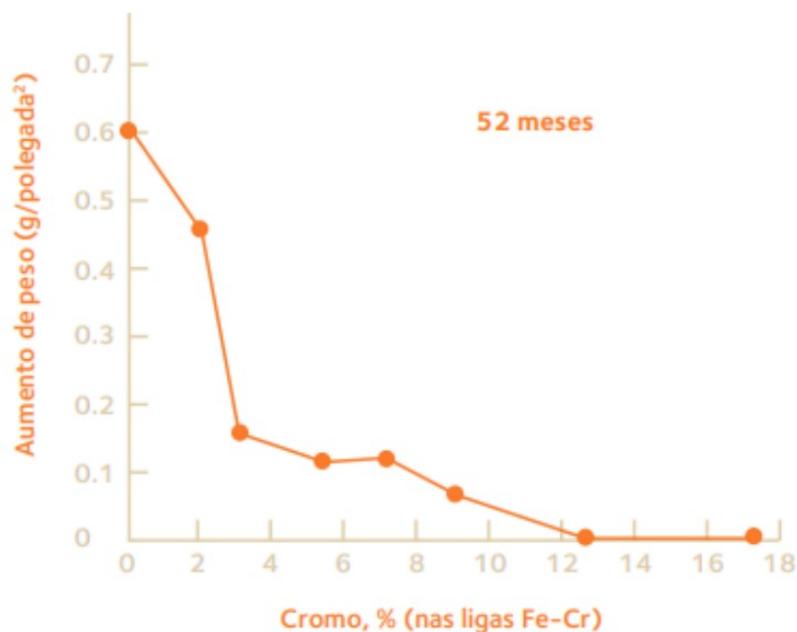
Os aços inoxidáveis têm como principal característica um comportamento resistente quando expostos a ambientes que podem ocorrer corrosão e oxidação. Um aço inoxidável (AI) é formado por ligas de ferro (Fe), carbono (C) e o cromo (Cr), sendo que este deve possuir um percentual mínimo de 10,5% de Cr em sua composição. Esses aços vêm ganhando cada vez

mais espaço no mercado na produção de peças, equipamentos, sejam elas industriais ou não, produtos estes que podem ser de alta ou baixa complexidade e isso só se dá devido à grande versatilidade que esses aços oferecem (HEIDERSBACH, 2011).

Ainda segundo Heidersbach (2011), a microestrutura apresentada pelos aços inoxidáveis é um fator chave para determinar sua propriedade mecânica e, sendo assim, os aços inoxidáveis apresentam uma extensa variedade de propriedades mecânicas, porém a característica mais significativa desse aço é a resistência à corrosão, característica essa que é responsável por determinar a aplicação desses materiais.

A Figura 3 mostra que em atmosferas com baixos índices de contaminação (atmosferas rurais como exemplo), observa-se uma grande diminuição na velocidade de oxidação dessas ligas na medida em que a % de Cr aumenta. Acima de 12% constata-se que a liga já não sofre mais corrosão atmosférica (NUNES, 2000).

Figura 3 – Oxidação das ligas de acordo com a % de Cr

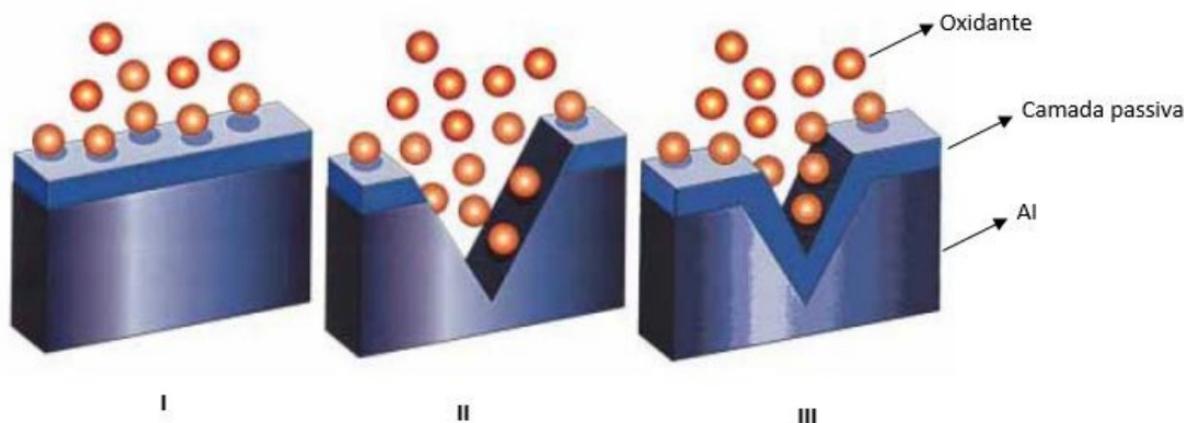


Fonte: Adaptado de (NUNES, 2000)

O Cr é o agente responsável pela formação de uma fina camada de filme passivo no aço, que o protege contra o ataque corrosivo. Esse filme também é conhecido como camada passiva, sendo impermeável e insolúvel nos meios corrosivos usuais. São especialmente finos (nos aços inoxidáveis possuem uma espessura de cerca de 30 a 50 Å). Mesmo quando rompido, esse filme se regenera em atmosfera oxidante e mantém a capacidade de proteção a corrosão (CARVALHO, 2020).

A Figura 4 ilustra a formação dessa camada passiva nos aços inoxidáveis, onde a esfera laranja é o oxidante, o azul celeste é a camada passiva e o azul escuro o aço inoxidável. Em I observa-se que a camada passiva está sobre o aço inoxidável impedindo a ação do oxidante. Em II há o rompimento da camada passiva e uma leve ação do oxidante. Em III ocorre a repassivação quase que imediata.

Figura 4 – Formação da camada passiva nos aços inoxidáveis



Fonte: Adaptado de (CARVALHO, 2020)

Segundo Castro (2005), diversos outros elementos de liga são adicionados para melhorar suas características, propriedades metalúrgicas, físicas, químicas e mecânicas, adequando-as às condições específicas de uso. Portanto, existem basicamente dois grupos de elementos de liga, os que estabilizam a fase austenita, denominados gamagenos (Ni, C, N e Mn) e os que estabilizam a fase ferrita, chamados alfagenos (Cr, Si, Mo, Ti e Nb).

Níquel (Ni): Sua adição favorece a formação de filme óxido especialmente em ambientes redutores. Nos aços inoxidáveis esse papel é fundamental devido aos altos teores de Cr e Mo e baixos de C e N. Além disso o Ni, tem por objetivo conferir resistência à corrosão em conjunto com boa resistência mecânica e ductilidade e altos teores de Ni contribuem para a formação de austenita retida nos processos de têmpera e revenimento (CARROUGE, 2002).

Carbono (C): tem como principal característica a de conferir aumento da resistência mecânica do aço, sendo que essa mesma propriedade pode ser prejudicial à resistência à corrosão dos aços inoxidáveis. Isto se deve ao fato de haver a combinação do carbono com o cromo formando carbonetos que se formam preferencialmente nos contornos de grão. Dessa forma, as regiões próximas são empobrecidas de cromo e em determinadas condições apresentam comportamento anódico em relação à matriz promovendo pilha de corrosão

denominada sensitização e outro fator é que o carbono reduz a tenacidade nas ligas (GARZÓN & TSCHIPTSCHIN, 2005).

Nitrogênio (N): Segundo Garzon & Tschiptschin (2005), o N tem como principal função a de estabilizar a fase austenita e adia a formação de fases intermetálicas. Por ser um elemento intersticial, aumenta o limite de escoamento e de resistência do material à temperatura ambiente. O N é um elemento que atua na resistência por solução sólida, tem elevada solubilidade na austenita e melhora a resistência à corrosão (CHAUHAN et al., 2008).

Manganês (Mn): Geralmente é adicionado em teores de até 2% para substituir parte do Ni (que é um elemento consideravelmente caro), dessa forma reduz o teor de Ni adicionado, melhorando a relação custo-benefício. Também confere efeitos semelhantes ao do Ni, além de formar sulfetos na microestrutura do aço susceptíveis à corrosão seletiva (MARTINS e BONAVIDA, 2003).

Cromo (Cr): Segundo Carrouge (2002) o Cr é um elemento estabilizador da ferrita e possui a característica de formar um filme passivo constituído de óxidos de Cr (Cr_2O_3) que se formam rapidamente na superfície do metal. Uma vez formado, esse filme protege o metal reduzindo drasticamente a taxa de corrosão, atuando como uma barreira. O efeito favorável de Cr na resistência à corrosão existe mesmo em quantidades menores que 11%, sendo esse valor considerado como necessário para atingir uma razoável resistência à corrosão atmosférica. O excesso na adição de Cr resulta na formação de ferrita delta, o que diminui a resistência e a tenacidade dos aços inoxidáveis martensíticos (KIMURA et al., 2004).

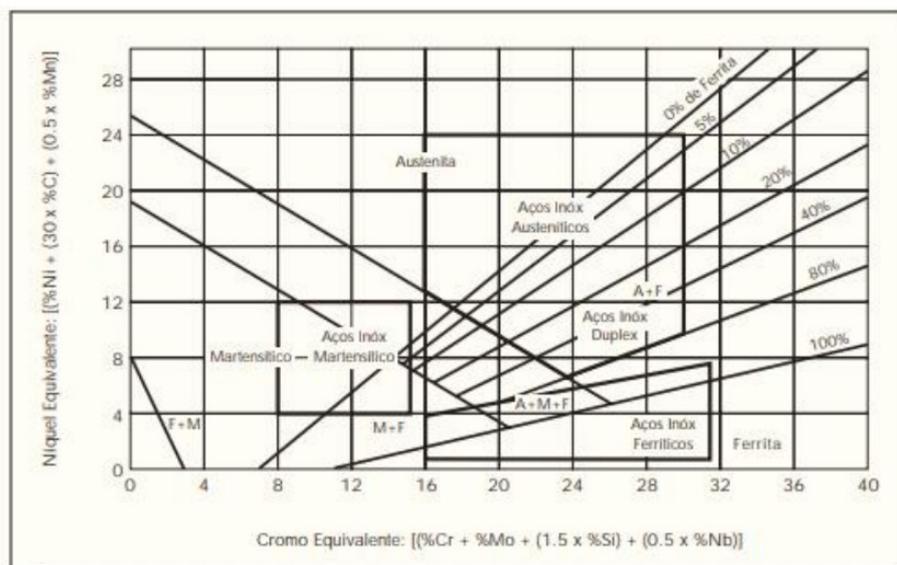
Silício (Si): Tem como principal característica ser formador de ferrita e não têm efeito direto sobre a precipitação de carbonetos e sobre a dureza da martensita. É essencial como desoxidante durante refino do aço. Proporcionam o aumento de resistência à corrosão sob fraturante da liga (C.A.D. Rodrigues et al., 2007).

Molibdênio (Mo): é um elemento estabilizador da ferrita e atua nas ligas aumentando a resistência à corrosão. O Mo é responsável por estabilizar o filme óxido de cromo na superfície do aço, melhorando substancialmente a resistência à corrosão por pites e por frestas. O teor de molibdênio na liga deve ser balanceado com a adição de elementos estabilizantes da austenita, tais como C, N e Ni (MARTINS e FORTI, 2008).

Titânio (Ti) e Nióbio (Nb): Possuem a capacidade de reduzir principalmente a corrosão intergranular e melhorar a soldabilidade do material, assim como, são usados para diminuir a tendência ao crescimento de grãos e estabilizar carbonetos (C.A.D. Rodrigues et al., 2007). Formam carbonetos mais estáveis que o carboneto de Cr. Por evitar a combinação do Cr com o C, reduz a probabilidade do fenômeno de sensitização (C.K.S, et al., 2015).

Segundo Azevedo (2012), os elementos de liga com características semelhantes foram agrupados no Cr e no Ni equivalente. A partir deste agrupamento foi construído o diagrama de Schaeffler, que relaciona a microestrutura de um aço trabalhado com a sua composição química. Este diagrama está apresentado na figura 5 e o teor de Cr e Ni equivalente são calculados pelas equações representadas nos eixos.

Figura 5 – Diagrama de Schaeffler

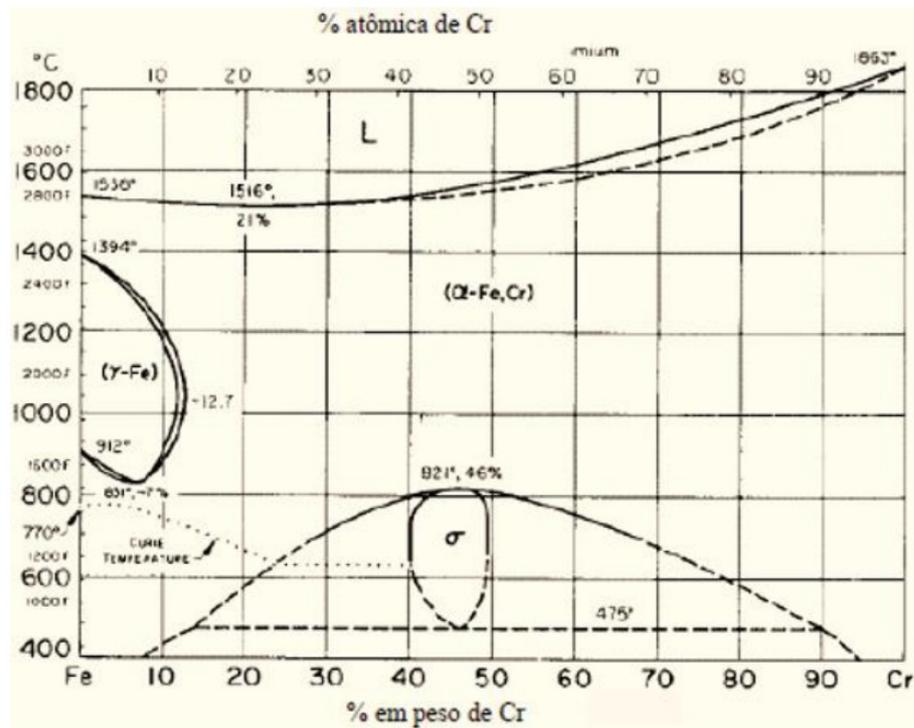


Fonte: Adaptado de (Azevedo, 2012)

Analisando-se o diagrama de Schaeffler (Figura 5), percebe-se as três regiões com as fases ferrita, austenita e martensita. A área correspondente aos aços ferríticos, martensíticos, austeníticos e duplex.

Como forma de representar a base para todos os aços inoxidáveis, especialmente os martensíticos e ferríticos, foi criado o diagrama de fase Fe-Cr. Esse diagrama mostra a forma alotrópica do Fe que está representada na parte inferior do mesmo. Para teores acima de 12,7% o Cr é o elemento que estabiliza a estrutura da ferrita, (CCC). Sendo assim, o aumento desse elemento, expandirá os campos ferrita δ e α respectivamente. À medida que o campo da ferrita expande, conseqüentemente o campo da austenita γ (CFC) contrai (TOTTEN, 2007). A Figura 6 representa o diagrama de fase Fe-Cr.

Figura 6 – Diagrama de fase Fe-Cr



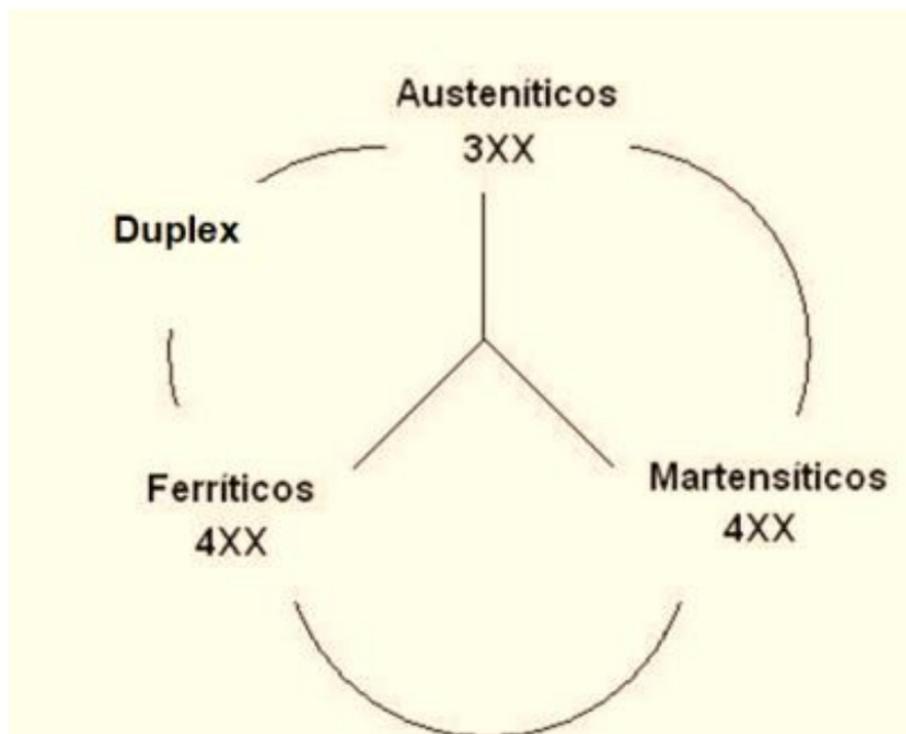
Fonte: Adaptado de (TOTTEN, 2007)

Segundo o diagrama de fase Fe-Cr (Figura 6), a fase austenítica (γ) fica restrita entre as temperaturas de 850 e 1400°C com um teor máximo de Cr de 12,7%. A expansão da fase γ pode ser feita através da adição de elementos que aumentem a estabilidade da austenita, como por exemplo, Ni, Mn, Cu e elementos intersticiais como C e N (TOTTEN, 2007).

3.1.2 Classificação dos Aços Inoxidáveis

Segundo Boniardi & Casaroli (2014), as quatro principais famílias de aços inoxidáveis são classificadas baseadas em suas microestruturas sendo elas: austenítico, ferrítico, duplex e martensítico. Na Figura 7, tem-se essas famílias de acordo com suas respectivas classificações.

Figura 7 – Representação das famílias dos aços inoxidáveis e suas classificações



Fonte: Adaptado de (TAVARES, 2015)

Para cada peça, produto e aplicação específica, existe uma série de aço inoxidável mais propícia a ser utilizada. São previstas muitas dezenas de classificações dos aços inoxidáveis. Nelas, os 2 dígitos finais XX indicam os centésimos da porcentagem de C contida no material, podendo variar entre 05, que corresponde a 0,05% de C, a 95, que corresponde a 0,95% de C. Se a porcentagem de C atinge ou ultrapassa 1,00%, então o final tem 3 dígitos (XXX) e a classificação tem um total de 5 dígitos (Boniardi & Casaroli, 2014).

3.1.2.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

São ligas constituídas por Fe, e teores de Cr que variam entre 16% e 30% e de Ni alternando entre 8% e 35%. Apresentam, à temperatura ambiente, uma elevada ductilidade, alto limite de resistência e um baixo limite de escoamento. São, entre os aços inoxidáveis, os materiais de melhor soldabilidade e resistência geral à corrosão e são inúmeras as suas utilizações. Encontram aplicações na indústria química, alimentícia, de refino de petróleo e em diversos outros casos em que são necessárias boa resistência a corrosão, facilidade de limpeza e ótimas características de fabricação (SILVA, 2009).

Segundo Matlakhov, (2008), os aços inoxidáveis austeníticos são resistentes à corrosão em vários meios, exceto atmosferas marinhas em que são atacados severamente por cloretos, que penetram através da película passiva e causam corrosão por pite. Para melhorar na resistência de corrosão por pite, costuma-se adicionar Mo. A estrutura cristalina CFC confere a esses aços alta capacidade de deformação e os mesmos não podem ser endurecidos por tratamento térmico, mas sim por trabalho a frio e isso se deve a estrutura austenita que é uma fase de alta temperatura, estável em altas temperaturas e possui uma estrutura cúbica de faces centradas (CFC). A característica principal da austenita é que ela é relativamente macia e não pode ser endurecida por meio de tratamento térmico, como têmpera e revenimento. O trabalho a frio altera a estrutura cristalina do aço austenítico, tornando-o mais duro e mais resistente

Na Tabela 1 tem-se a apresentação das composições químicas dos tipos mais comuns de aços inoxidáveis austeníticos. Os aços mais comumente são os da série 300 da AISI, caracterizadas por serem altamente resistentes à corrosão. Além do Ni e do Cr, podem ser encontrados também o Mn, que assim como N e C, são estabilizadores de austenita.

Tabela 1 – Composição química dos principais aços inoxidáveis austeníticos (% em peso)

AISI	% C	% Mn	% Si	%Cr	%Ni	% OUTROS
304	0,08	2,0	1,0	18 - 20	8 – 10,5	0,1 N
304L	0,03	2,0	0,75	18 - 20	8 – 10,5	0,1 N
304H	0,04 -0,1	2,0	0,75	18 - 20	8 – 10,5	-
304N	0,08	2,0	0,75	18 - 20	8 – 10,5	0,1 - 0,16 N
316	0,08	2,0	0,75	18 - 20	10 – 14	2 – 3 Mo
316L	0,03	2,0	0,75	16 – 18	10 – 14	2 – 3 Mo 0,1 - 0,16 N
317L	0,03	2,0	0,75	18 – 20	11 – 15	3 - 4 Mo 0,1 N
321	0,08	2,0	0,75	17 – 19	9 – 12	0,1 N
347	0,08	2,0	0,75	17 – 19	9 -12	-
310S	0,08	2,0	1,5	24 – 26	19 -22	-
201	0,15	5,5 – 7,5	0,75	16 – 18	3,5 – 5,5	0,1 N

Fonte: (ASTM A240, 2004)

3.1.2.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos (α) são formados por ligas binárias Fe-Cr que possuem estrutura CCC que é a mesma do Fe à temperatura ambiente. Apresentam altos teores de Cr que variam de 12% a 30%. Os elementos C e N são considerados residuais e normalmente identificados na forma de precipitados, nitretos e carbonetos de Cr. O tratamento térmico mais usado para esse aço é o recozimento que alivia as tensões originadas na conformação a frio e para a obtenção da máxima ductilidade. Sua aparência microscópica é de uma matriz ferrítica com precipitados ao longo dos contornos de grão (FILHO; FERRARESI, 2006).

Segundo o ISSF (2007), os aços inoxidáveis ferríticos possuem melhores propriedades mecânicas e de resistência à corrosão quando comparados aos austeníticos, além de superá-los em algumas características, sendo a principal delas, melhor custo-benefício.

Segundo Lippold & Kotecki (2005), os AIF (aços inoxidáveis ferríticos) atualmente podem ser divididos em 3 gerações que se diferem pela composição química. A Geração 1 é composta por ligas médio Cr e alto C, por isso apresentam as martensitas intergranulares à temperatura ambiente. Os aços da Geração 2 receberam mudanças na composição e entre essas alterações, observa-se a adição de elementos como Ti e Nb, que possuem maior tendência a precipitar-se na forma de carbonetos e nitretos. A Geração 3 conta com alto teor de Cr e redução dos elementos intersticiais (C e N), conferindo uma maior resistência à corrosão e melhorando as características de dureza e ductilidade. A tabela 2 mostra os principais representantes das três gerações de aços inoxidáveis ferríticos.

Tabela 2 – Composição química dos principais aços inoxidáveis ferríticos (% em peso)

AISI	% C	% Mn	% Si	%Cr	%Ni	OUTROS
405	0,08	1,0	1,0	11,5 – 14,5	0,6	
430	0,12	1,0	1,0	16 – 18	0,75	
434	0,12	1,0	1,0	16 – 18	-	0,75 – 1,25 Mo
409	0,08	1,0	1,0	10,5 – 11,75	0,5	
436	0,12	1,0	1,0	16 – 18	-	0,75 – 1,25 Mo
439	0,03	1,0	1,0	17 – 19	0,5	0,15[0,2+4(C+N)]-1,1Ti
444	0,025	1,0	1,0	17,5 – 19,5	1,0	0,20+4[C+N]-0,8Ti+Nb
XM-27	0,01	0,4	0,4	25 – 27,5	0,5	0,05 – 0,20 Nb
29-4	0,01	0,025	0,02	28 - 30	3,5 – 4,2	0,15 Cu

Fonte: (ASTM A240, 2004)

3.1.2.3 Aços Inoxidáveis Duplex

Os AID (aços inoxidáveis duplex) são ligas que possuem microestrutura bifásica composta por austenita (γ) e ferrita (α) em quantidades praticamente iguais. A combinação entre as duas fases confere aos aços duplex boa resistência à corrosão sob tensão, aumento da resistência à corrosão intergranular, quando comparado com os aços inoxidáveis austeníticos, boa soldabilidade e excelentes propriedades mecânicas. A presença de ferrita causa um efeito muitas vezes benéfico nas propriedades físicas do material, como a redução do coeficiente de expansão térmica, tornando-a bem próxima dos aços ferríticos e o aumento da condutividade térmica. A presença das duas fases também favorece a ocorrência de problemas comuns tanto para aços inoxidáveis austeníticos quanto para os aços inoxidáveis ferríticos, como precipitação de carbonetos, precipitação de fases intermetálicas, fragilização aos 475 °C, dentre outros. O balanço das fases pode ser realizado através de alterações na composição química da liga, bem como através de tratamentos termomecânicos (VASCONCELOS, 2011).

Os aços inoxidáveis duplex são compostos por Fe, Cr, Ni, Mo e outros elementos de liga como o N e são caracterizados também pelo seu baixo teor de C (<0,03%). Possuem aplicações na indústria química, indústria marinha, de petróleo e gás e indústria de papel e celulose (CHARLES, 2007).

Ainda segundo Charles (2007), os AID apresentam excelentes propriedades mecânicas (resistência e tenacidade) aliado a boa resistência à corrosão. Uma vez que a composição química tem influência sobre a resistência à corrosão, estabeleceu-se um parâmetro denominado PREN. Este parâmetro se baseia na composição química das ligas, sendo a fórmula mais utilizada dada pela equação 1.

$$PREN = \%Cr + 3,3(\%Mo + 0,5(\%W)) + 16(\%N) \quad Eq. (1)$$

Um PREN elevado indica que a liga pode ser mais resistente à corrosão localizada, porém não se pode desprezar a influência da microestrutura. Em geral, as fórmulas não levam em consideração a porcentagem de impurezas eventualmente presentes na liga (TOTTEN, 2007).

A Tabela 3 apresenta as principais composições dos aços inoxidáveis duplex, bem como o valor médio do PREN.

Tabela 3 – Composição química dos principais aços inoxidáveis duplex (% em peso) e valores de PREN

UNS	% C	% Mn	% Si	%Cr	%Ni	% N	OUTROS	PREN
S32304	0,03	2,5	1,0	21,5 – 24,5	3 - 5	0,05 – 0,20	0,1 - 0,6 Mo	22,63
S32205	0,3	2,0	1,0	22 - 23	4,5 – 6,5	0,14 – 0,20	3 – 5 Mo	34,14
S32750	0,03	1,2	1,0	24 – 26	6 - 8	0,24 – 0,32	3 – 5 Mo	37,74
S32760	0,03	1,0	1,0	24 - 26	6 - 8	0,2 - 0,3	3 – 4 Mo 0,5 – 1,0 W	37,92

Fonte: (ASTM A240, 2004)

3.1.2.4 Aços Inoxidáveis Martensíticos

Segundo Chiaverini (2008) os aços inoxidáveis martensíticos (AIM) são Aços-Cr com pequena adição de Ni. Possuem boa combinação de propriedades mecânicas e resistência à corrosão, devido ao teor de Cr presente. Sendo esse o motivo de serem utilizados em aplicações que requerem propriedades, tais como: componentes de indústria petroquímica, cutelaria, instrumentos cirúrgicos, eixos de hélices marítimas, mancais, entre outros.

Na tabela 4 tem-se os principais aços inoxidáveis martensíticos e suas principais aplicações.

Tabela 4 - Principais aços inoxidáveis martensíticos e suas aplicações

Aperam South America	Principais Aplicações
420A	Cutelaria, instrumentos de medição, hospitalares, odontológicos e cirúrgicos; áreas de mineração e siderurgia, além de lâminas de corte e discos de freios, facas, lâminas e correntes para máquinas de lavar garrafas.
420D	
410D	Lâminas de turbinas forjadas ou usinadas em tesouras, instrumentos de medida e componentes da indústria petroquímica
498A	Cutelaria profissional (frigoríficos, abatedouros e açougues).
ENDUR 300®	Aplicações que requerem resistência mecânica, resistência à corrosão e ao desgaste leve em equipamentos para mineração, cimento, agronegócio e caçambas.

Fonte: Adaptado de (APERAM, 2016)

Ao introduzir elementos de liga no sistema Fe-C, mudanças são ocasionadas no campo de estabilidade da austenita e da ferrita. O papel principal desses elementos é o de estabilizar a formação de carbonetos (DALMAU, 2018). A redução do campo de estabilidade da austenita é consequência da adição de Cr no sistema Fe-C, que resulta, também, em formação de carbonetos ligados ao Cr (PINEDO, 2004).

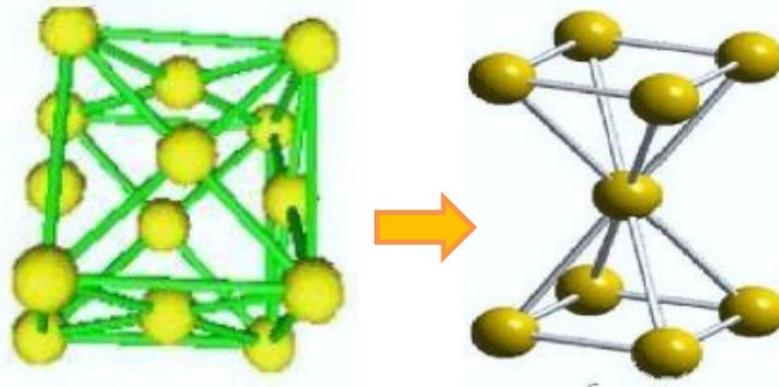
Os aços inoxidáveis martensíticos foram desenvolvidos para atender a necessidade da indústria por ligas que apresentem moderada resistência à corrosão e que sejam capazes de atingir alta resistência mecânica através de tratamentos térmicos. São ligas capazes de serem totalmente austeníticas em alta temperatura de tal forma que a austenita formada possa se transformar em martensita na têmpera ou resfriamento até a temperatura ambiente (TOIT, 2012).

Os aços inoxidáveis martensíticos podem ser temperáveis ao ar, água e óleo e a temperatura de revenimento depende das propriedades mecânicas desejadas. A resistência à corrosão é prejudicada conforme o teor de C aumenta, mas é compensada com um aumento no teor de Cr. O teor de Cr precisa ser dissolvido na matriz metálica para garantir a passivação, e o aumento do teor de C favorece a formação de carboneto de Cr ocasionando fragilidade e baixa resistência à corrosão, resultando também na precipitação do carboneto $Cr_{23}C_6$ nos contornos dos antigos grãos de austenita. Para compensar a redução do teor de C, adiciona-se elementos de liga, como o Ni. Variando a concentração, é possível mudar a temperatura de transformação da martensita e, portanto, a quantidade de austenita residual à temperatura ambiente (DALMAU, et al., 2018).

Dependendo da composição e da história de processamento, a microestrutura do aço inoxidável martensítico consiste em martensita e carbonetos não dissolvidos (RAJASEKHAR, 2008).

Conforme Rethwisch (2015), esses aços em altas temperaturas apresentam microestrutura austenítica, e quando há o resfriamento rápido subsequente, têmpera, a austenita presente é transformada em martensita, conferindo dureza e resistência mecânica elevada. São muito usados na fabricação de artigos de cutelaria. Durante a transformação adifusional da austenita em martensita, os átomos se movem, até que ocorra a mudança na estrutura do material. Como consequência desse movimento, forma-se a estrutura TCC, uma solução sólida supersaturada de C. Essa estrutura representa uma forma distorcida do $Fe \alpha$, em que os interstícios octaédricos são ocupados pelo C. A microestrutura martensítica possui reticulado tetragonal de corpo centrado (TCC) que é obtida a partir do resfriamento rápido da austenita, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Representação da estrutura CFC (à esquerda) e após a deformação da rede em martensita, célula TCC (à direita)



Fonte: Adaptado de (CALLISTER; RETHWISCH, 2015)

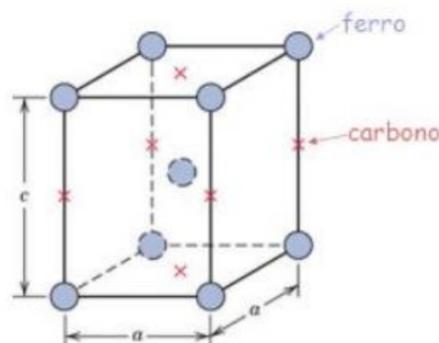
A martensita é usualmente uma solução sólida supersaturada de carbono no Fe e tem uma estrutura (TCC) que é uma forma distorcida da ferrita com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). A tetragonalidade pode ser medida pelo quociente c/a conforme equação 2 e aumenta conforme o teor de C (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2017).

$$c/a = 1 + 0,045 \% p \quad \text{Eq. (2)}$$

onde a e c são as dimensões do reticulado da martensita e $\% p$ é a porcentagem de C.

Segundo Haldar (2009), o resfriamento ocorrido no aço tem que ser tão rápido que irá evitar a formação de carbonetos, ficando o mesmo retido em solução, onde se forma a célula unitária tetragonal de corpo centrado, mostrando os átomos de Fe e os sítios que podem ser ocupados pelo C, conforme Figura 9.

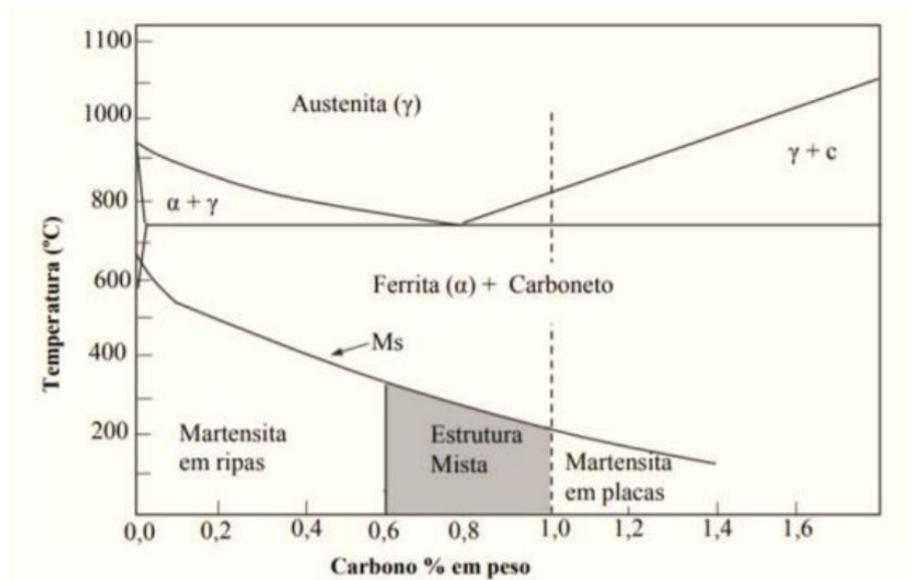
Figura 9 – Célula Unitária Tetragonal de Corpo Centrado (TCC)



Fonte: (HALDAR, 2009)

Segundo Gracioso (2003), a presença desses átomos de C em solução intersticial na estrutura do Fe está relacionada à alta dureza, uma vez que há uma deformação na rede. Esta tende a ser aliviada por uma redistribuição dos próprios átomos de C para posições mais favoráveis junto às discordâncias. Em aços carbono martensíticos comuns, as duas principais morfologias da martensita são: em ripas e em placas. A martensita em ripas, é formada em aços que apresentam baixos teores de C, abaixo de 0,6% em peso. Já a morfologia em placas, o teor de C é superior a 1%. Entre 0,6 e 1% forma-se uma microestrutura mista, como se pode observar na Figura 10.

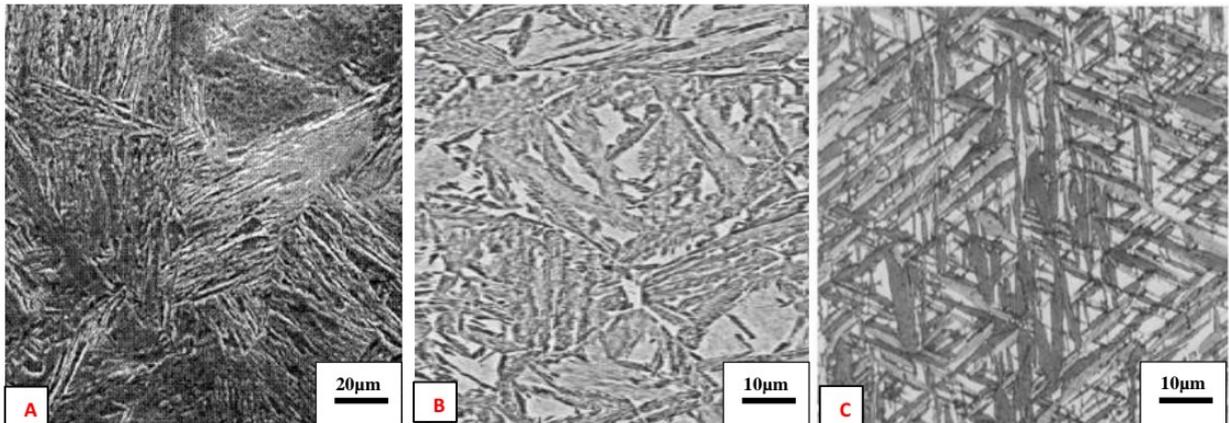
Figura 10 - Tipos de martensita formadas em uma liga Fe-C



Fonte: Adaptado de (GRACIOSO, 2003)

Segundo Moraes (2006) os aços inoxidáveis do tipo martensíticos possuem em sua estrutura de 12% a 18% de Cr, de 0,1% a 0,5% de C e 0,1% a 3% de Ni e podem atingir diversos graus de dureza pela variação de aquecimento e resfriamento. Além disso podem possuir outros elementos de liga como Mn, S, P, Si entre outros. Todas essas ligas são responsáveis por esse material martensítico que é formado, como pode-se observar na Figura 11.

Figura 11 – Exemplo de microestrutura martensítica característica vista pelo MEV: a) Martensita em ripas, b) Martensita Mista e c) martensita em placas



Fonte: Adaptado de (Kahl, 2015)

O elevado conteúdo de elementos de liga nos aços inoxidáveis martensíticos requer um cuidado durante as operações de conformação a quente destes materiais. Os elementos (especialmente C e Cr) têm forte influência sobre as transformações microestruturais que podem ocorrer durante essas operações. Outro fator importante correlacionado às transformações de fase na conformação a quente dos aços inoxidáveis martensíticos é a microestrutura no estado como recebido, que é normalmente composta por carbonetos globulares em uma matriz ferrítica. Nos processos de conformação a quente, o rápido aquecimento leva a conexão dos carbonetos, dificultando a homogeneização da composição química da austenita (CARDOSO, 2011).

A martensita é uma fase rica em C, frágil e extraordinariamente dura. Os aços inoxidáveis martensíticos têm a principal característica como de serem magnéticos e endurecíveis por tratamento térmico, apresentando quando temperados uma microestrutura acicular. É de suma importância observar que estes aços são normalmente fornecidos pela indústria siderúrgica em estado recozido, com ductilidade razoavelmente boa. Somente depois de temperados eles serão muito duros e pouco dúcteis. Mas é precisamente nesta condição (temperados) que eles são resistentes à corrosão. Em estado recozido (estrutura ferrítica), não apresentam bom comportamento frente à corrosão atmosférica (DI CUNTO, 2005).

Aços inoxidáveis martensíticos são usados quando a combinação de alta resistência e baixas temperaturas é necessária. Existem essencialmente três tipos de aço inoxidável martensítico. O primeiro tipo é composto por aqueles que contêm carbono e que são reforçados pela precipitação do carboneto de ferro quando temperado a baixas temperaturas ou por endurecimento secundário – esses são chamados de “cutelaria”. O segundo tipo é o aço que

contêm baixas quantidades de carbono, mas que são reforçados pela precipitação de partículas de cobre ou intermetálicos – esses são chamados de tipo “turbina”. O terceiro tipo é o aço que é fortalecido pela precipitação e carbonetos – também chamados de “resistente ao desgaste”. Os três tipos têm um alto teor de Cr (GARRISON, 2001). Na Tabela 5 pode-se verificar os principais aços inoxidáveis martensíticos e suas principais composições.

Tabela 5 – Composição química dos principais aços inoxidáveis martensíticos (% em peso)

AISI	% C	% Mn	% Si	%Cr	%Ni	% OUTROS
410	0,15	2,0	1,0	11 – 12	-	-
420	0,35	1,0	1,0	12 – 14	0,6	-
440A	0,75	1,0	1,0	16 - 18	0,75	-
440B	0,95	1,0	1,0	16 - 18	0,75	-
440C	1,20	1,0	1,0	16 - 18	0,75	-
431	0,20	1,0	1,0	15 - 17	1,25 – 2,5	0,3 Mo

Fonte: (ASTM A240, 2004)

3.2 Tratamentos Térmicos

Uma vez que as propriedades dos aços inoxidáveis martensíticos podem ser alteradas de maneira significativa com os tratamentos térmicos, essas ligas são empregadas em uma grande variedade de situações (PARK JY, Park YS, 2007; Chakraborty, G, 2015).

Diferentemente de outros aços inoxidáveis, as propriedades mecânicas dos aços martensíticos podem variar em uma faixa bastante ampla, de acordo com a forma como seu tratamento térmico é realizado (temperaturas de tratamento, tempos de patamares etc.). Em função desta característica, este material é empregado em aplicações das mais diversas, desde ferramentas para extração de petróleo até materiais cirúrgicos (ISFAHANY et al., 2011).

Os tratamentos térmicos podem ser descritos por ciclos de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidades de aquecimento e resfriamento, com o objetivo de alterar as propriedades de certos materiais metálicos, conferindo-lhes características determinadas e causando modificações em suas microestruturas sem que haja mudanças na forma do produto (CHIAVERINI, 2008).

Na Figura 12, tem-se a representação dos 3 processos sendo eles: austenitização, têmpera e revenido. Nos tratamentos representados, pode-se verificar que o material é aquecido

até a temperatura de austenitização, logo depois resfriado através do processo da têmpera e a realização do revenimento pós-têmpera.

Figura 12 – Gráfico com esquema dos 3 tratamentos térmicos – Austenitização, Têmpera e Revenido



Fonte: Adaptado de (SANTOS, W.C. et al – 2015)

Segundo Duarte (2015), para a realização do tratamento térmico nos aços inoxidáveis martensíticos, esse material, primeiramente, é austenitizado na faixa entre 900 °C e 1100 °C e depois é resfriado numa taxa suficiente para a formação da martensita. Após isso, é realizado o revenimento, para alívio de tensões e aumento da ductilidade.

3.2.1 Austenitização

Segundo Siqueira (2019), sendo o material adquirido normalmente no estado recozido, nessa condição, sua microestrutura é composta por uma matriz ferrítica com carbonetos metálicos dispersos. O tratamento de austenitização promove a dissolução destes carbonetos, podendo ocorrer dissolução parcial ou completa, de acordo com a temperatura de austenitização, tempo de patamar e, inclusive, taxa de aquecimento.

Barlow e Du Toit (2012) observaram dissolução completa dos carbonetos apenas em temperaturas acima de 1175 °C.

Uma baixa temperatura de austenitização conduz a baixos valores de tenacidade devido a não dissolução dos carbonetos e, uma alta taxa de temperatura causa o crescimento acentuado dos grãos austeníticos. A temperatura de austenitização depende do grau de dissolução do carboneto desejado e da necessidade de evitar a formação de ferrita delta por sobreaquecimento.

Uma inadequada taxa de resfriamento promove incompleta formação martensítica. A parte não formada em martensita, após o tratamento de revenido, forma a conhecida martensita não revenida, que também se forma por um revenido realizado em baixa temperatura. (RODRIGUES A.D, CÉSAR, 2009)

Segundo Scheuer (2014) a dureza aumenta em função do aumento da temperatura de austenitização e pode ser atribuída ao incremento do teor de C e Cr na martensita, devido à dissolução dos carbonetos de Cr, aumentando a supersaturação da rede de martensita. Estudos realizados com tratamentos térmicos de têmpera em temperaturas acima de 1100 °C mostraram que a dureza do material tende a diminuir, devido à fração retida de austenita formada a partir dessas temperaturas. A austenita retida é uma fase de alta temperatura que não é completamente transformada em martensita durante a têmpera. A presença de austenita retida em temperaturas tão altas pode resultar em uma diminuição da dureza do material. Isso acontece porque a austenita é uma fase menos dura em comparação com a martensita. Portanto, quanto maior a quantidade de austenita retida, menor será a dureza do material após a têmpera.

Isfahany et al. (2011) avaliaram aços com composição de 0,22%C e 12,98%Cr, empregando temperaturas de austenitização variando entre 980°C e 1050°C, com tempos de permanência também variando (30 min a 120 min). No presente trabalho será analisado exatamente com essas variações, temperaturas de 980°C, 1015°C e 1050°C variando entre os tempos de encharque de 30, 60 e 120 min.

Segundo De-ning Zou et.al. (2014), o efeito da temperatura de austenitização nas propriedades mecânicas e na microestrutura pode ser dividido em 3 faixas.

- 940°C à 1000°C

Quando a faixa de temperatura aumenta nessa faixa ocorre redução significativa da resistência a dureza e tração.

- 1000°C à 1100°C

À medida que a temperatura aumenta o limite de escoamento, resistência a dureza e tração aumentam devido a formação de uma microestrutura fina de martensita e pouquíssima quantidade de austenita retida.

- Acima de 1100°C

Acima dessa temperatura é gerado o crescimento do grão austenítico gerando redução do limite de escoamento, resistência à tração, dureza e alongamento.

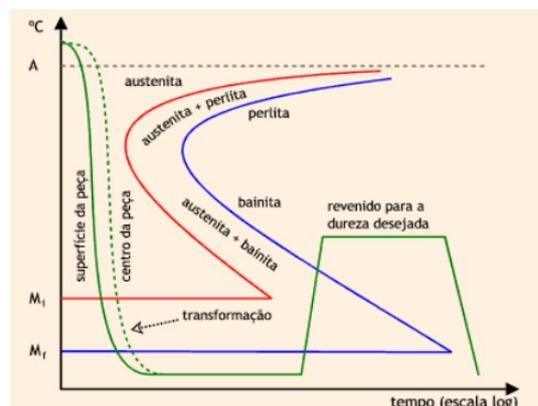
3.2.1 Têmpera

Os aços inoxidáveis martensíticos são endurecidos pelo tratamento térmico de austenitização seguido de têmpera que, como se sabe, provoca a transformação martensítica adifusional (dependendo da velocidade de resfriamento e da composição química do aço). Os aços inoxidáveis martensíticos ao serem tratados termicamente pelo processo de têmpera apresentam um aumento na resistência à corrosão, devido à dissolução de carbonetos de Cr. A fim de se obter a microestrutura mais desejada, o tratamento térmico deverá consistir em têmpera e revenido. A têmpera consiste na austenitização, seguida por um resfriamento rápido até temperatura ambiente (SILVA, Mariana, 2016).

Conforme informado, o tratamento de têmpera consiste no aquecimento do aço acima da sua temperatura de austenitização seguido de resfriamento rápido em meios como água, ar ou óleo, para obtenção de uma estrutura metaestável martensítica. No resfriamento rápido em água, os átomos de C ficam presos no interior da austenita. Desse modo, os átomos produzem considerável deformação no retículo da ferrita, dando tensão ao material e aumentando sua dureza devido as tensões internas serem tanto maiores quanto maior o teor de C em excesso (MEI, 2011)

Ainda segundo MEI (2011), o resfriamento rápido provoca a transformação da austenita em martensita. Essa transformação depende da temperatura de início de transformação martensítica, M_i , e termina somente quando a transformação total se completa em M_f . Sendo assim, M_i é maior que M_f . Quando essa transformação é completada, a estrutura cristalina remanescente é tetragonal de corpo centrado (TCC). A Figura 13 descreve o diagrama TTT com os pontos M_i e M_f .

Figura 13 – Diagrama TTT de um aço carbono



Fonte: (CHIAVERINI, 2008)

No diagrama TTT o resfriamento é a parte esquerda da curva, isto é, da temperatura pouco acima de A até pouco abaixo de Mf. Quanto mais próximo do meio de resfriamento, maior a velocidade. Assim, há duas curvas extremas, uma para a superfície e outra para a região central. A dureza da martensita e as tensões resultantes das diferenças estruturais provocadas pelas diferentes velocidades de resfriamento resultam em um material bastante duro, mas frágil e com reais possibilidades de trincas ou deformações, a depender do nível dessas tensões. O revenido é um tratamento posterior à têmpera, que consiste em elevar a temperatura até certo nível e manter por algum tempo, conforme restante da curva verde. O resultado é um alívio das tensões internas e redução da dureza, tanto maior quanto maiores a temperatura e o tempo de revenido (CHIAVERINI, 2008).

De acordo com Santos (2015), os aços martensíticos possuem a temperatura de austenitização que varia na faixa de 930°C até 1050°C. Temperaturas acima dessa faixa podem provocar o crescimento excessivo do grão austenítico e o aparecimento da fase ferrita delta, que resulta em queda da dureza, enquanto temperaturas inferiores não são suficientes para dissolver a quantidade máxima de carbonetos e homogeneizar a estrutura. No presente trabalho será realizado o resfriamento da têmpera em água a temperatura ambiente.

3.2.1 Revenido

Como resultado do tratamento de têmpera, o material apresenta alta resistência mecânica devido às suas tensões internas, o que torna o material frágil, de maneira geral quando se realiza uma têmpera deve-se fazer um tratamento de revenimento para alívio das tensões internas e melhora de sua ductilidade. Tratamento de revenimento realizado após a têmpera, tem como objetivo chegar a uma tenacidade e dureza desejável (MEI, 2011).

O revenimento consiste no aquecimento seguido de um resfriamento lento, ao ar. Nos aços inoxidáveis que contêm elementos como silício, molibdênio, vanádio e cromo, quando revenidos em temperaturas próximas de 500°C, estes elementos vão para o contorno de grão e se ligam com o carbono formando carbonetos, provocando o chamado segundo endurecimento (COLPAERT, 2008).

Dependendo da temperatura, o revenimento apresentará aspectos diferentes, ocorrendo o seguinte (CHIAVERINI, 2006):

- Revenimento entre 120 e 250°C: esta é a zona para o revenimento de alta resistência ao corte. À medida que a temperatura aumenta as tensões internas diminuem o que melhora a resistência ao choque, começa o aparecimento de microestrutura de martensita revenida.

- Revenimento entre 250 e 300°C: zona de resistência ao choque e menor dureza. As tensões internas diminuem mais ainda pois nesta fase começa a surgir uma microestrutura mesclada de martensita.

- Revenimento entre 300 e 400°C: zona de melhor resistência ao choque. A recuperação da microestrutura metaestável promove elevada resistência ao choque e impactos.

- Revenimento entre 400 e 600°C: zona de aumento significativo de ductibilidade e menor dureza.

Há uma preocupação quanto a temperatura de revenimento, pois se a mesma estiver entre 450 e 600°C, ela pode prejudicar tanto a resistência ao impacto como a resistência à corrosão, esse fato pode ser atribuído à precipitação de carbonetos, nitretos, sulfetos, após o resfriamento à temperatura ambiente (PRYDS, 2000).

Ainda sobre essa faixa de temperatura, esse fenômeno é chamado de sensitização, que é relacionado a precipitação de carbonetos ricos em Cr_{23}C_6 nos seus contornos de grão. Quanto maior o teor do Cr maior a probabilidade de carboneto ser formado. A formação de carboneto é o resultado da combinação de Cr com o C livre, ocorrendo quando o aço é exposto a temperaturas acima de 450°C, tornando-o sujeito à corrosão intergranular. Isso faz com que as regiões adjacentes aos contornos de grão fiquem empobrecidas de Cr, que como consequência ajuda na formação da corrosão por pites (MARIANO, MUROLO, 2006).

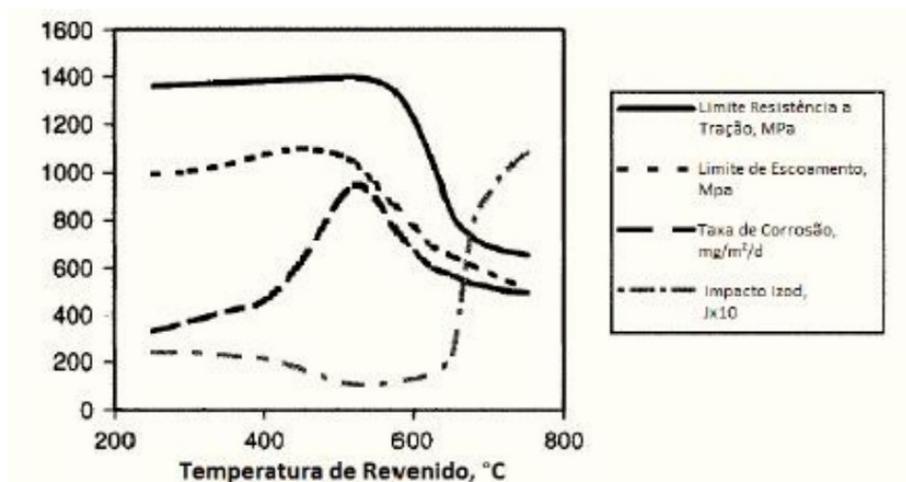
Diversos aços, principalmente aço-liga de baixo teor em liga, caracterizam-se por adquirirem fragilidade, quando são aquecidos na faixa de temperaturas entre 375 e 575 °C, ou quando são resfriados lentamente através dessa faixa. Este fenômeno é conhecido com o nome de “fragilidade de revenido”. Adicionalmente, esse fenômeno da austenita retida pode levar a problemas de fragilidade durante o revenido. Durante o tratamento térmico de revenido, a austenita retida é transformada em martensita, que é uma fase mais dura e mais frágil. Isso pode resultar em uma diminuição da tenacidade e resistência ao impacto do material (MARCOMINI, 2008).

Segundo Marcomini, (2008), não se tem uma explicação clara dessa fragilidade de revenido, embora se tenha observado concentração de impurezas nos contornos dos grãos o que comprova que é necessária a presença dessas impurezas, juntamente com um elemento de liga, para provocar esta fragilidade. Aparentemente, o Mo, em teores 0,5 a 1,0% retarda a suscetibilidade à fragilidade de revenido.

Como forma de se evitar esse fenômeno da fragilidade do revenido, deve-se procurar não entrar na faixa de temperatura prejudicial (375°C a 575°C), e caso seja atingido, deve-se aumentar a velocidade de resfriamento para encurtar a permanência do aço nesse intervalo de

temperatura. Temperaturas mais baixas não causam perda na resistência à corrosão, como pode ser verificado na Figura 14, pois a grande maioria dos carbonetos que precipitam abaixo dessa temperatura é de Fe, cementita (Fe_3C) (CHIAVERINI, 2008).

Figura 14 – Efeito da temperatura de revenido em um aço martensítico



Fonte: Adaptado de (CHIAVERINI, 2008).

3.3 Corrosão

A corrosão pode ser definida basicamente como a deterioração de um metal ou liga, a partir de sua superfície, pelo meio no qual está inserido. O processo envolve reações de oxidação e de redução (redox) que convertem o metal ou componente metálico em óxido, hidróxido ou sal (SILVA V.F, MARCOS et al., 2014).

A corrosão causa grandes prejuízos econômicos e quando atingem valores altos, enfraquecem das mais variadas estruturas, gerando risco a toda população. Segundo dados do IZA (Internacional Zinc Association) com dados obtidos pela USP-SP, 4% do PIB do Brasil foi consumido pela corrosão em 2019 e isso deve permanecer nos próximos anos. Os prejuízos econômicos causados pela corrosão atingem valores consideravelmente altos além do ponto de vista ambiental (ICZ, 2020).

Uma das principais e mais importantes características dos aços inoxidáveis é a sua excelente resistência à corrosão quando comparados aos demais aços, entretanto essas ligas não são imunes a esse tipo de dano, sendo suscetíveis principalmente à corrosão localizada (GONÇALVES D. S. J et al, 2017).

Gentil (2011), define corrosão como a destruição ou a deterioração de materiais por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos, sendo dentre

os agentes de corrosão, os meios mais corrosivos encontrados, são: atmosfera, em solos, produtos químicos, águas naturais e do mar.

As reações de corrosão são espontâneas e enquanto na metalurgia adiciona-se energia ao processo para obtenção do metal, na corrosão observa-se um retorno espontâneo do metal à forma combinada, com a consequente liberação de energia. Este ciclo é denominado de ciclo dos metais e pode ser observado na Figura 15 (PONTE,2003).

Figura 15 – Ciclo dos Metais



Fonte: Adaptado de (PONTE, 2003)

Os processos de corrosão química são menos frequentes na natureza, e se caracterizam basicamente por: ausência da água líquida, altas temperaturas, sempre acima do ponto de orvalho da água e interação direta entre o metal e o meio corrosivo. Como na corrosão química não se necessita de água líquida, ela também é denominada de corrosão seca (NUNES, 2007). A Tabela 6 apresenta as principais características de cada um dos processos corrosivos de natureza química e eletroquímica.

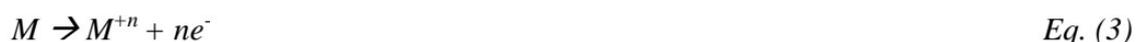
Tabela 6 - Característica da corrosão química e eletroquímica

Natureza do processo corrosivo	Características
Corrosão eletroquímica (corrosão aquosa)	Presença de água líquida Temperatura abaixo do ponto de orvalho Formação de pilhas ou células eletroquímicas
Corrosão química	Ausência de água líquida Temperatura acima do ponto de orvalho Interação direta entre o metal e o meio

Fonte: Adaptado de (Nunes, 2007)

Segundo Nunes (2007), a mais frequente é a corrosão eletroquímica e a mesma é associada a uma passagem de corrente elétrica, que envolve o movimento de partículas carregadas, íons e/ou elétrons. Os elétrons são cedidos em determinadas regiões e recebidos em outras, formando uma pilha de corrosão.

Estudos de Gentil (2011), mostram que o metal é oxidado e se dissolve no anodo, tornando-se um íon e perdendo elétrons. Os elétrons se direcionam para a área catódica e se envolvem numa reação catódica. Na Equação 3 uma reação anódica está descrita.

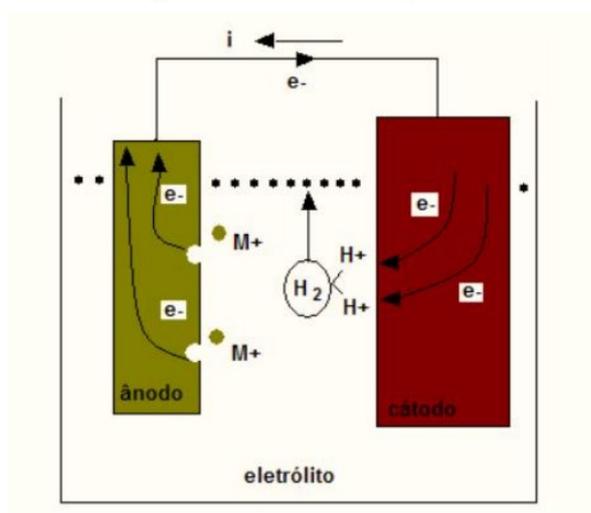


Já a região catódica é definida de acordo com a equação 4.



É possível perceber através das equações 3 e 4 e da Figura 16, que há perda de elétrons durante as reações de oxidação e ganho de elétrons nas reações de redução respectivamente, de forma que tanto a oxidação quanto a redução, numa reação eletroquímica, ocorrem juntas e são interdependentes.

Figura 16 - Célula Eletroquímica



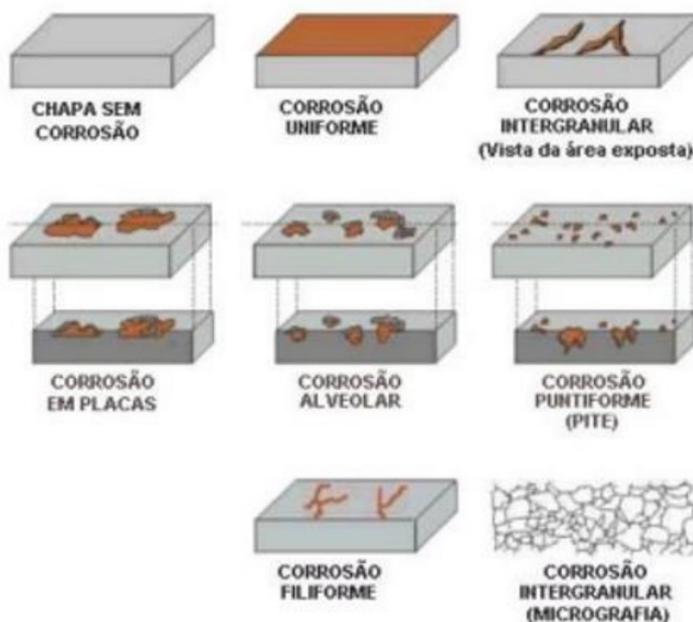
Fonte: (ASM INTERNATIONAL, 2003)

3.3.1 Tipos de corrosão

Segundo Siqueira (2018), o conhecimento das características das diferentes formas de corrosão é de suma importância para a análise do processo e sua possível proteção. A classificação mais comum do tipo de corrosão é morfológica, onde configurações e aparência externa do material são levadas em consideração.

A corrosão pode ser encontrada de diversas formas sendo as principais: corrosão por pites, corrosão uniforme, corrosão intergranular, alveolar, em placas, ainda a filiforme, mais comumente presente em películas de tintas e revestimentos. Pode-se verificar através da Figura 17 os principais tipos de corrosão encontrados (GENTIL, 2011).

Figura 17 – Principais formas de corrosão



Fonte: (ICZ, 2020)

Corrosão Uniforme: É a mais comum e facilmente controlável entre as formas de corrosão. É caracterizada por uma camada visível de óxidos e hidróxidos pouco aderente, mas encontrada em toda extensão do material. (GENTIL, 2011).

Corrosão Intergranular: Essa corrosão ocorre quando existe um caminho preferencial para a corrosão na região dos contornos de grão em ligas passiváveis. Tal caminho pode ser resultado de alterações na composição química em áreas específicas do material e é responsável por uma diferença na resistência à corrosão (BIRBILIS et al., 2012; CHEN et al., 2017).

Corrosão em placas: Esse tipo de corrosão geralmente ocorre em algumas regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações (KIM et al., 2014).

Corrosão Alveolar: Como seu próprio nome diz, esse tipo de corrosão é parecido com alvéolos, possuem fundo arredondado e profundidade menor que o diâmetro e podem causar perfurações (KIM et al., 2014).

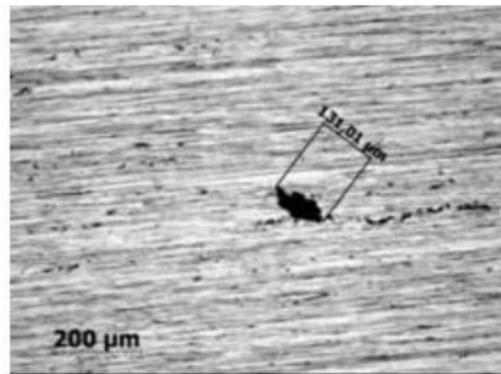
Corrosão Filiforme: Este tipo de corrosão é bem mais frequente em ambientes cuja umidade relativa do ar é maior que 85%. Tem como característica, se processar sob a forma de finos filamentos, com pouca profundidade, que se caracterizam em diferentes direções e que não se cruzam. Ocorre geralmente em superfícies metálicas revestidas com filmes poliméricos, tintas ou metais ocasionando o deslocamento do revestimento (GENTIL, 2011).

Corrosão Puntiforme (Pite): Segundo (Ribeiro, et al., 2005), a corrosão por pites e suas características morfológicas são aspectos importantes para serem considerados nos componentes sujeitos a sollicitações mecânicas em ambientes corrosivos devido a sua influência sobre a nucleação de micro trincas de fadiga.

A corrosão por pite é uma forma de corrosão localizada que ocorre em pontos e que geralmente está presente em pequenas áreas localizadas na superfície do metal, porém com grande profundidade, geralmente maior que o seu diâmetro (GENTIL, 2011). Há algumas etapas do mecanismo químico da formação dos pites, sendo:

- Quebra da Camada Passiva: Os aços inoxidáveis possuem uma camada passiva de óxido de cromo (Cr_2O_3) na superfície que normalmente os protege da corrosão. No entanto, os íons de cloreto têm a capacidade de quebrar essa camada passiva. Isso ocorre porque os íons de cloreto podem adsorver-se na superfície do aço e interagir com os íons de cromo na camada passiva.
- Formação de Ácido Clorídrico (HCl): Quando os íons de cloreto interagem com os íons de cromo na superfície do aço inoxidável, eles podem liberar prótons (íons de hidrogênio) e formar ácido clorídrico (HCl) na interface metal-camada passiva.
- Redução do Óxido de Cromo: O ácido clorídrico formado reage com o óxido de cromo na camada passiva, reduzindo-o a íons de cromo (Cr^{3+}) e liberando oxigênio (O_2). Esta reação pode ser representada por $2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} \rightarrow 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{CrCl}_3 + 3\text{O}_2$.
- Difusão Limitada de Oxigênio: Em locais onde a camada passiva foi quebrada devido à ação do HCl, a difusão do oxigênio é frequentemente limitada. Isso ocorre porque a camada passiva normalmente atua como uma barreira à difusão de oxigênio para o metal. A baixa concentração de oxigênio nas áreas corroídas promove a corrosão localizada.
- Formação do Pite: Com a redução do óxido de cromo e a limitação da difusão de oxigênio, ocorre a formação de pequenos poços (pites) na superfície do aço. Esses pites podem corroer o metal localmente, criando um padrão irregular de corrosão. A origem do pite está associada à perda da camada passivadora do material em uma pequena área. A perda dessa camada pode acontecer, de forma química ou mecânica. Essencialmente, todos os metais e ligas que passivam no ambiente de interesse podem sofrer corrosão por pite (KELLY, 2005). A Figura 18 mostra uma micrografia com o desgaste ocasionado por esse tipo de corrosão.

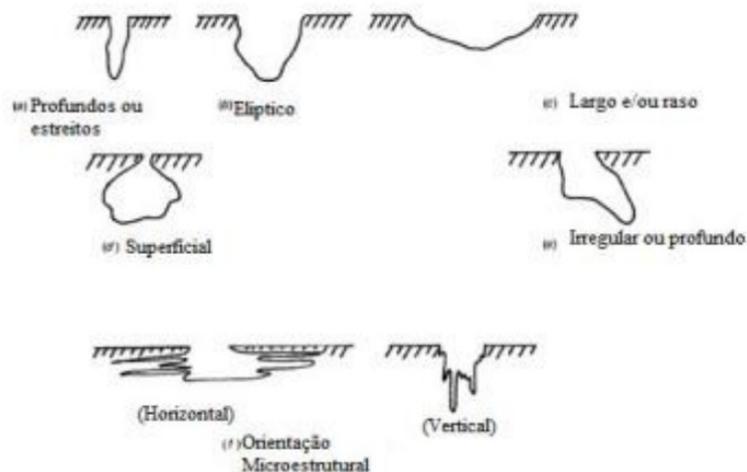
Figura 18 – Micrografia com corrosão por pite em um aço inoxidável



Fonte: Adaptado de (KAHL, 2015)

A corrosão por pites em aços inoxidáveis martensíticos de baixo carbono, geralmente, inicia-se nos contornos de grão entre grãos martensíticos. O pite começa a crescer, inicialmente, de forma isotrópica, para posteriormente se propagar por caminhos correspondentes com orientações dispersas de grãos (DALMAU, et al., 2018). A figura 19 mostra as principais morfologias dos pites nos aços.

Figura 19 – Diferentes tipos de morfologias de pites encontradas nos aços

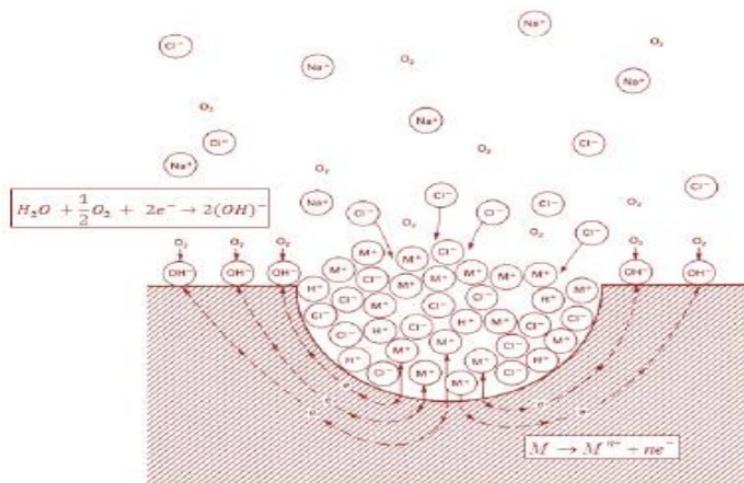


Fonte: (ASTM G46-94, 2013)

A Figura 20, mostra a nucleação do pite, nucleação esta que é caracterizada pela migração do íon cloreto da solução para a interface do metal, e quando o íon cloreto (Cl^-) desestabiliza o filme pode ocorrer a formação do pite embrionário (Kelly, 2005). Segundo Gentil (2011), dentro do pite (anodo) há uma dissolução rápida do metal, enquanto a redução de O_2 ocorre nas superfícies adjacentes (óxido protetor) que funcionam como catodo. Esse processo é autoestimulado, pois a dissolução rápida do metal dentro do pite produz um excesso

de cargas positivas nessa área, resultando na migração dos íons cloreto para lá, a fim de manter a neutralidade de cargas. Assim, dentro do pite, passa a existir uma elevada concentração de cloreto do metal.

Figura 20 – Esquema de corrosão por pite de metal exposto a uma solução de NaCl



Fonte: Adaptado de (ASM INTERNATIONAL, 2003)

A fim de se caracterizar a superfície que foi corroída por pites, deve ser sempre considerado o número de pites por unidade de área, profundidade e diâmetro dos mesmos. O número de pites por unidade de área e o diâmetro do pite é de fácil determinação utilizando-se um microscópio. Já a profundidade de um pite só é calculada fazendo-se um corte transversal na amostra realizando a medição diretamente ou mesmo utilizando um microscópio no qual se focaliza no interior do pite e em seguida na superfície que não foi corroída. Essa diferença é a profundidade do pite (GENTIL, 2011).

De acordo com Dunn (2004), a formação dos pites se dá pela diferença eletroquímica do exterior para o interior do pite. Na área interior do pite acontecem as reações de oxidação do metal enquanto na área exterior ocorrem as reações de redução. Quando o pite vai crescendo, ele assume diferentes morfologias o que torna importante determinar a extensão do mesmo, seja para previsão da vida útil ou em testes laboratoriais.

3.3.2 Ensaio de Corrosão

As indústrias têm procurado diariamente respostas rápidas e seguras para a avaliação dos produtos e serviços oferecidos pelo mercado para o combate à corrosão. A fim de conseguir tais respostas de forma segura e mais rápida, existem os chamados ensaios de corrosão. A

corrosão pode ser testada via laboratório (simulando condições de operação e testes acelerados) ou mesmo em operações (avaliações em indústrias e testes de campos). Para determinação do tipo de corrosão e suas causas, pode ser feita a caracterização das amostras por meio de análises eletroquímicas, utilizando instrumentos específicos (COX, 2014).

Segundo Cox (2014), aspectos-chave relacionados ao ensaio de corrosão em aços podem ser descritos como:

- Seleção do aço e da condição de teste: Primeiro, é importante escolher o aço inoxidável de interesse e definir a sua condição, incluindo composição química, tratamento térmico e acabamento superficial, se aplicável. Essas variáveis podem afetar significativamente a resistência à corrosão.

- Meio corrosivo: Importante determinar o meio corrosivo relevante para a aplicação específica. Pode ser ácido, soluções salinas, ambientes marinhos, produtos químicos específicos ou qualquer outra substância que o material possa encontrar em uso real.

- Método de ensaio: Existem vários métodos de ensaio de corrosão disponíveis, sendo os mais comuns:

- Ensaio de corrosão por imersão: O aço inoxidável é submerso no meio corrosivo por um período específico e a taxa de corrosão é medida ao longo do tempo. Isso pode envolver medições de perda de massa, análise da superfície corroída e monitoramento eletroquímico.

- Ensaio de corrosão acelerada: Este método utiliza condições mais severas ou aceleradas para simular a corrosão em um período mais curto. Isso pode envolver o uso de soluções corrosivas mais concentradas ou temperaturas elevadas.

- Ensaio de Corrosão Cíclica: Este método simula condições de corrosão realistas, alternando ciclos de exposição a um ambiente corrosivo com ciclos de um ambiente não corrosivo. Isso é especialmente útil para avaliar a resistência à corrosão de peças expostas a condições variáveis, como carrocerias de automóveis.

- Ensaio de Polarização: Este ensaio mede a resposta eletroquímica do material em um ambiente corrosivo. Ele envolve a aplicação de uma variação controlada de potencial elétrico às amostras e a medição das correntes resultantes. Isso ajuda a determinar a taxa de corrosão e a identificar o potencial de corrosão do material.

- Avaliação dos resultados: Após o ensaio, os resultados são analisados para determinar a taxa de corrosão, a forma e a extensão da corrosão, bem como qualquer outra informação relevante. Isso ajuda a avaliar a resistência à corrosão do aço inoxidável testado.

Além dos ensaios de corrosão em ambiente controlado, também é importante considerar a exposição ao ambiente real de uso. Fatores como temperatura, pressão, tensões mecânicas e

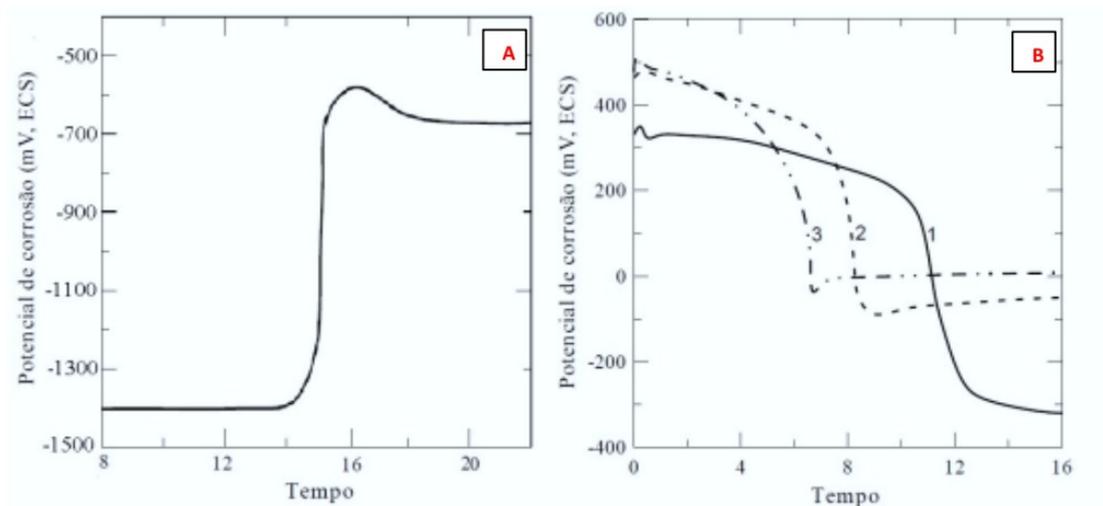
outros podem influenciar a corrosão do aço inoxidável em uma aplicação específica. Os resultados do ensaio de corrosão são cruciais para a seleção adequada de materiais em ambientes corrosivos. Eles fornecem informações sobre a vida útil do material, a necessidade de revestimentos protetores e a manutenção preventiva necessária para evitar falhas prematuras devido à corrosão (DUNN, 2004).

3.3.2.1 Curva OCP (Potencial em circuito aberto)

O potencial em circuito aberto (OCP) acompanha a variação do potencial do metal na solução de acordo com o tempo. Por não existirem recursos práticos para medir o potencial absoluto de um eletrodo, a medida é feita em relação a um eletrodo de potencial conhecido (eletrodo de referência), obtendo assim uma curva de potencial versus tempo. Nessa técnica não é aplicada a polarização forçada do eletrodo, ou seja, os sinais gerados são livres de perturbações externas, registrando somente os sinais devido a reações espontâneas na interface de corrosão (BERTHOMÉ, 2006).

O potencial de corrosão é um dos parâmetros eletroquímicos de mais fácil determinação experimental. Como se trata de um potencial assumido pelo metal, é suficiente obter a medida direta desse potencial com relação a um eletrodo de referência. Essa medida é conhecida como medida de potencial em circuito aberto. Casos em que o OCP tende a valores positivos com o tempo indica a formação de uma nova interface menos reativa no meio, tornando assim o metal mais passivo. Já se o potencial decresce é uma indicação de que o metal está submetido a um processo de dissolução reductiva. Todos esses dois processos de formação e dissolução de camada passiva são ilustrados na Figura 21 (WOLYNEC, 2003).

Figura 21 - Variação do potencial em circuito aberto (OCP) conforme a reação na qual é exposto o sistema: a) formação da película de óxido (à esquerda) e b) dissolução da película de óxido (à direita)



Fonte: (WOLYNEC, 2003).

3.3.2.2 Curva de Polarização Cíclica

Esta técnica é usada para avaliar a tendência que os materiais apresentam ao sofrer ataques localizados na forma de corrosão por pites ou por frestas. Este ensaio consiste em uma varredura potenciodinâmica partindo-se de um potencial mais anódico, cerca de -250 mV, abaixo do potencial de corrosão, atingindo-se valores de potencial desejado ou, um certo valor de densidade de corrente, pré-programados. Quando a varredura alcançar o valor de densidade de corrente programada, o traçado da curva irá se reverter e iniciará a varredura na direção anódica. Normalmente o limiar de densidade de corrente (valor programado via software) é tipicamente da ordem de $1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ (MAGNABOSCO, 2001).

Nas varreduras potenciodinâmicas, em geral, diferenças relativas são observadas. A forma geral da curva potenciodinâmica é uma indicação do comportamento de corrosão do corpo de prova na solução teste e dela pode-se obter informações do tipo:

- 1) Habilidade do material passivar espontaneamente ou não em determinado meio.
- 2) A faixa de potencial na qual o corpo de prova permanece passivo.
- 3) A taxa de corrosão na região passiva.
- 4) Aparição de pites, quando o meio dá condições

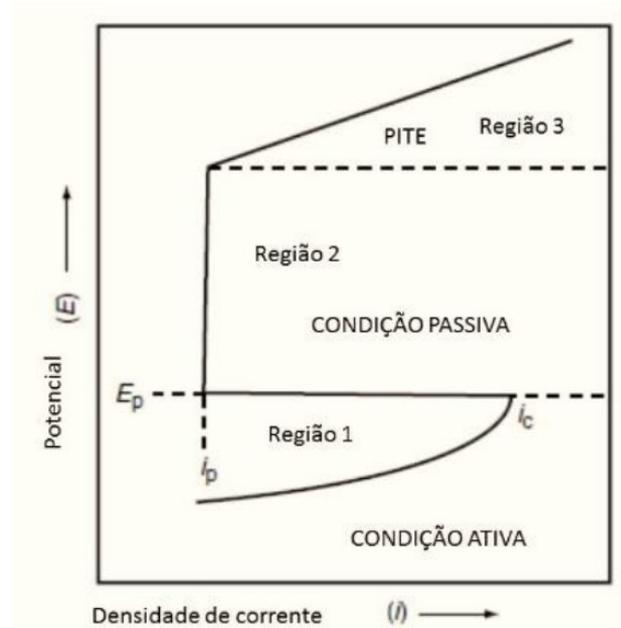
Quanto maior for o valor da velocidade de varredura, menor será a duração do teste, porém, os valores de densidade de corrente obtidos tornam-se deslocados para à direita na curva potencial versus densidade de corrente. Logo, uma varredura de polarização cíclica fornece uma mostra qualitativa do mecanismo de corrosão por pites.

Segundo Alberti, (2004) a equação de Nernst representa bem a polarização que pode ser definida como a diferença entre dois potenciais (conhecido como η) e essa diferença é o resultado entre o potencial de equilíbrio (E), obtido quando o metal está em equilíbrio com a solução que contenha seus próprios íons, fazendo com que haja alteração no potencial do metal, surgindo um novo valor (E'). A equação 5 mostra a equação de Nernst.

$$\eta = E' - E \quad \text{Eq. (5)}$$

A polarização também é representada através da Figura 22, onde mostra-se as regiões características do comportamento ativo-passivo do metal.

Figura 22 - Curva de Polarização para o comportamento ativo-passivo



Fonte: Adaptado de (SOUZA, 2015)

Na condição ativa, o processo de corrosão ocorre em toda a superfície metálica. Quanto mais o potencial aumenta, a densidade de corrente também aumenta, resultando num valor de corrente crítica (i_c). A partir desse ponto, a densidade de corrente do sistema começa a cair, pois a camada passiva começa a ser formada, fazendo com que o material atinja seu potencial de passivação primário. A corrente continua caindo até chegar no potencial de passivação (E_p). Nessa região de passivação, a corrente resultante permanece baixa (i_p), pois o material está protegido por uma camada de filme que é formado na superfície, proporcionando uma baixa velocidade de corrosão. Após isso, ocorre a ruptura da camada passiva, fazendo com que a

densidade de corrente comece a crescer novamente. Em seguida, o material entra na região de transpassivação, local em que a corrosão ocorre (SOUZA, 2015).

A curva de Tafel é uma ferramenta utilizada para avaliar parâmetros a fim de se obter valores de potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão. São realizadas em duas varreduras, sendo que uma segue o sentido anódico e a outra o catódico. (ALBERTI, 2004).

Butler-Volmer deduziu a relação entre corrente e o sobrepotencial (η), para os casos de equilíbrio eletroquímico. Para os casos de corrosão, são utilizadas analogias das equações de Butler-Volmer que foram verificadas empiricamente por Tafel (KULIKOVSKY, A. A., 2019). Assim a lei de Tafel segue o modelo mostrado na equação 6.

$$\eta = a + b \log i \quad \text{Eq.(6)}$$

Onde: a e b são respectivamente os coeficientes linear e angular das retas de Tafel e i a corrente.

Para as equações 7 e 8, βc e βa representam as constantes de Tafel, R a constante dos gases ideais, F é constante de Faraday, α é o coeficiente de transferência de carga, T temperatura e n número de oxidação da espécie eletroativa.

- Reação catódica:

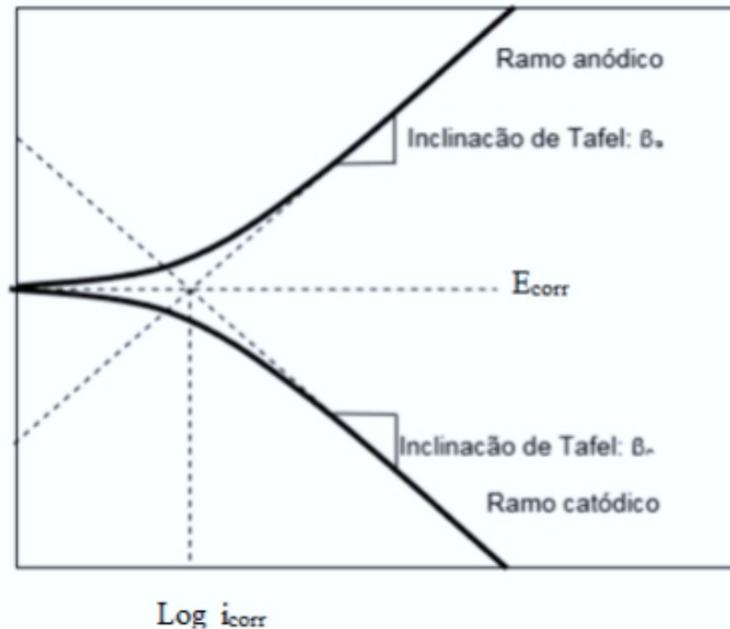
$$ac = \beta c \log(icorr) \text{ sendo que } \beta c = 2,303RT / (1-\alpha)\eta F \quad \text{Eq.(7)}$$

- Reação anódica:

$$aa = -\beta a \log(icorr) \text{ sendo que } \beta a = 2,303RT / \alpha\eta F \quad \text{Eq.(8)}$$

A equação 6 é representada no formato da equação da reta $y=ax +b$ e, a curva $\eta \times \log i$ tem como resultado uma reta com inclinação β , demonstrado na Figura 23. A convergência das partes lineares, tanto da anódica quanto da catódica, indica o E_{corr} e i_{corr} .

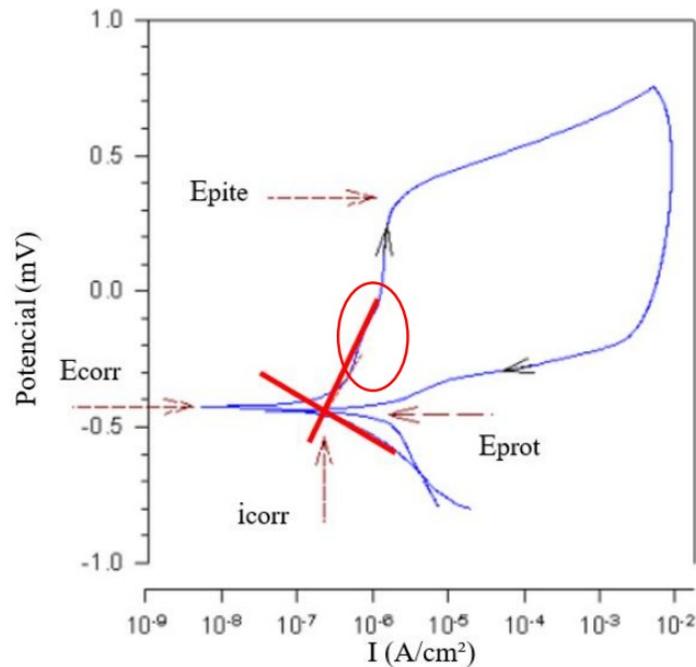
Figura 23 - Diagrama esquemático de TAFEL



Fonte: (ALBERTI, 2004).

Na Figura 24, tem-se uma curva de polarização cíclica suscetível a corrosão por pite. No potencial de pite (E_{pite}) ocorre a quebra do filme passivo. É o limite de potencial acima do qual inicia-se a formação do pite, acima desse ponto há a quebra de filme passivo que protege o material. Sendo assim, quanto maior for o valor desse potencial maior será a resistência a formação de pites. O círculo em vermelho da figura 24, mostra a área passiva da curva. Essa região é a qual o potencial do metal se estabiliza em um valor passivo e relativamente constante. Isso indica que a superfície do metal está desenvolvendo uma camada protetora, conhecida como camada passiva, que ajuda a proteger o metal da corrosão. O potencial de corrosão (E_{corr}) tem como principal característica a de quanto mais ser anódico, menor a tendência do material ser suscetível à corrosão. A densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) é diretamente proporcional a taxa de corrosão, assim, quanto menor o valor da densidade de corrente de corrosão, menor a taxa de corrosão com que o material irá deteriorar-se. Há também o potencial de repassivação ou proteção (E_{prot} ou E_{repass}) que se refere ao limite de potencial abaixo do qual o metal ou liga permanece passivo em qualquer circunstância, delimitando a fronteira entre a passividade estável e instável, também pode ser chamado de potencial crítico de pite (E_{CP}) (MAGNABOSCO, 2001).

Figura 24 - Parâmetros de susceptibilidade à corrosão por pite em uma curva de polarização cíclica



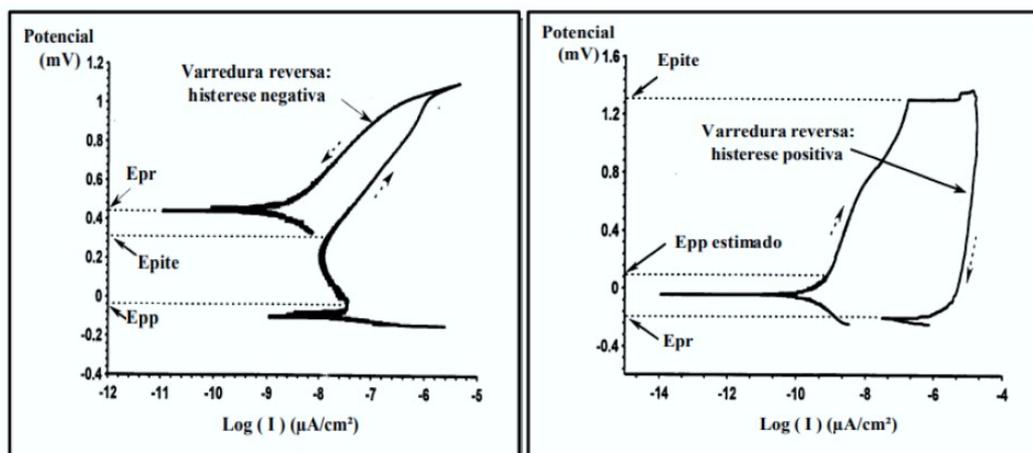
Fonte: Adaptado de (MAGNABOSCO,2001)

Dessa forma quanto maior a diferença entre $E_{píte}$ e E_{corr} , maior é a resistência à formação do pite e menos provável seu surgimento. Se o potencial de proteção ou de repassivação (E_{prot} / E_{repass}), for maior que o potencial de corrosão, o metal apresentará a tendência de regeneração da camada de passivação do material frente a uma eventual ruptura da mesma e, a repassivação será mais fácil quanto maior for a diferença entre estes potenciais. Já, se o potencial de proteção ou de repassivação (E_{prot} / E_{repass}), for menor que o potencial de corrosão, o metal permanecerá no estado ativo e, uma vez destruída a camada de passivação, os pites formados continuarão a crescer, sem interrupções (MAGNABOSCO, 2001).

Segundo Jiang (2007), há uma análise que vem sendo bem discutida na literatura para a interpretação do comportamento da corrosão por pite. Essa análise é o $\Delta E_{píte}$ que nada mais é que o módulo da diferença entre o potencial de pite e o potencial de corrosão ($|E_{píte} - E_{corr}|$). Este parâmetro é uma medida da resistividade do filme passivo e é um indicador do início da corrosão por pites. Quanto maior o valor de $\Delta E_{píte}$ maior a resistência a corrosão por pite.

A Curva de polarização cíclica leva em consideração a formação de uma curva de histerese que pode ser positiva ou negativa. A Figura 25 demonstra a histerese negativa que ocorre quando a densidade de corrente na varredura inversa é menor do que na direção de avanço e a histerese positiva que ocorre quando a densidade de corrente na varredura inversa é maior do que na direção de avanço (ARAÚJO, 1999).

Figura 25 – Representação da histerese negativa e positiva



Fonte: (TAIT, 1994)

A seta pontilhada nos gráficos apresentados (Figura 25) indica o sentido da polarização. No eixo x tem-se o logaritmo da densidade de corrente elétrica em amperes e no eixo y, tem-se o potencial em volts. E_{pp} significa potencial primário de passivação, $E_{píte}$ potencial de quebra de passivação ou também conhecido como “breakdown potencial” e E_{prot} o potencial de repassivação (CARDOSO, 2011).

Ainda segundo Cardoso (2011), a formação de uma histerese positiva indica que houve corrosão por pite, pois a densidade de corrente final é maior que a densidade inicial. Nesse caso, o filme passivo é quebrado e os íons cloreto (Cl^-) começam a atacar os locais do metal, causando a corrosão por pite. Quanto mais ampla for a curva, mais corroída está a amostra. Já para a histerese negativa, observa-se que a densidade de corrente final é menor que a inicial o que indica que não houve corrosão por pites e mesmo havendo a quebra do filme passivo, sua reposição é bem-sucedida sem que haja penetração de íons cloreto.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material

4.1.1 Amostra como recebida

O presente trabalho tem como material de estudo o aço inoxidável martensítico AISI 410D. A amostra recebida foi laminada em forma de chapas com espessura de 6 mm. Este aço foi produzido e doado para a realização do estudo pela empresa Aperam Inox América do Sul S/A. A composição química deste material foi fornecida pela empresa e estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química do aço inoxidável martensítico AISI 410D

AISI 410D	
Elemento	Peso (%)
C	0,014
Mn	0,561
Si	0,506
P	0,034
S	0,000
Cr	11,072
Ni	0,327
Mo	0,029
Al	0,001
Cu	0,029
Co	0,019
V	0,030
Nb	0,020
Ti	0,002
Sn	0,004
W	0,005

Fonte: (Aperam Inox América do Sul S/A, 2023)

4.2 Métodos

4.2.1 Fluxograma do trabalho desenvolvido

A Figura 26 representa todas as etapas detalhadas desempenhadas no decorrer do presente trabalho. Isso consiste na preparação de todas as amostras (corpos de prova), tratamentos térmicos, caracterização microestrutural e suas propriedades mecânicas, bem como ensaios eletroquímicos e análises da microestrutura pós ensaios.

Figura 26 – Fluxograma do trabalho desenvolvido



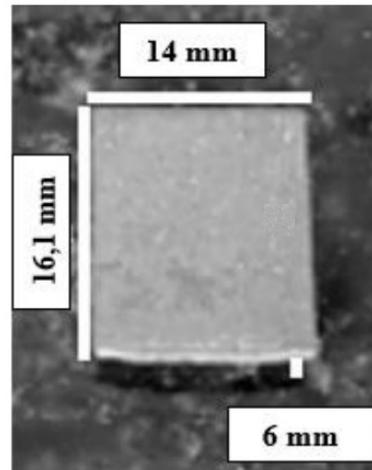
Fonte: (A autora, 2023)

4.2.2 Corpos de Prova

As amostras foram recebidas em chapas e as mesmas foram cortadas em tamanhos adequados para análise microestrutural e de corrosão, no Laboratório de Caracterização Microestrutural que fica localizado na EEIMVR (Escola de engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda). Para a realização desse corte foi utilizado a máquina de corte ISOMET

(fabricante Buehler). Foram utilizados como velocidade de corte 400 rpm e 150 gramas de carga aplicada. Foram ao todo 28 amostras do aço 410D, incluindo a amostra como recebida (CR), com dimensões de 16,1 x 14 x 6 (mm). A Figura 27 demonstra a amostra como recebida e suas respectivas dimensões.

Figura 27 – Amostra como recebida

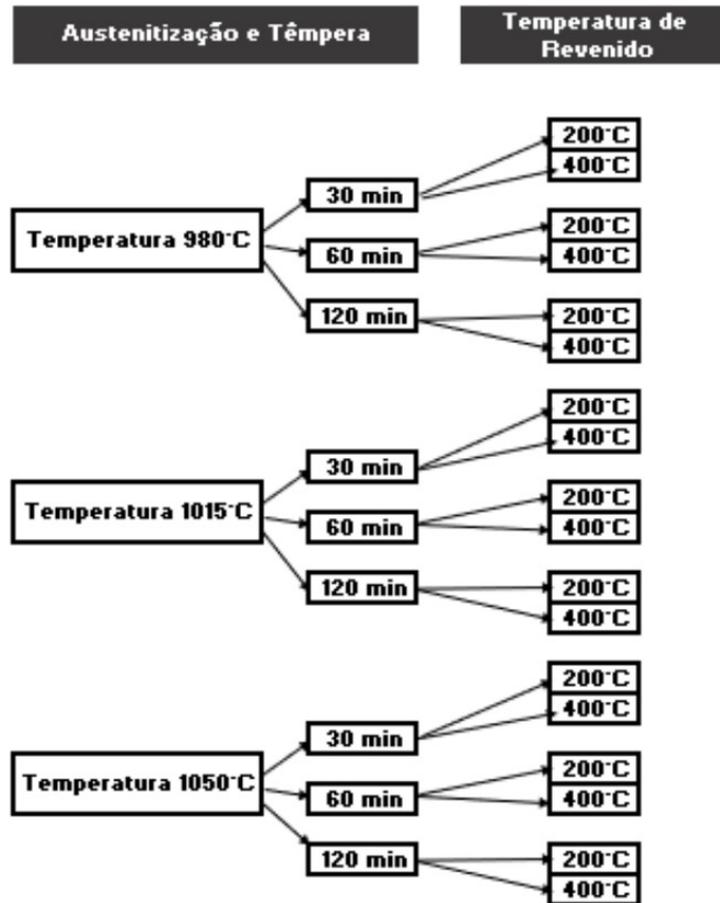


Fonte: (A autora, 2023)

4.2.3 Tratamentos Térmicos

As amostras do aço 410D foram submetidas aos tratamentos térmicos de austenitização, têmpera e revenimento, em diferentes temperaturas e tempos. A sequência dos tratamentos térmicos das amostras está esquematizada na Figura 28.

Figura 28 – Tratamentos Térmicos desenvolvidos



Fonte: (A autora, 2023)

4.2.3.1 Austenitização e Têmpera

Segundo Colpaert (2008), os aços inoxidáveis martensíticos devem ser austenitizados em temperaturas elevadas, na faixa de 900°C a 1100°C a fim de que haja completa dissolução dos carbonetos e seja obtida ao final do processo de austenitização uma austenita uniforme. Sendo assim, para realizar o tratamento térmico no aço inoxidável martensítico, esse material, primeiramente, foi austenitizado nas temperaturas de 980°C, 1015°C e 1050°C e depois resfriado através da têmpera em água para a formação da martensita.

De acordo com Duarte (2015) o aço inoxidável martensítico é muito sensível às condições empregadas no tratamento térmico, tais como:

- Baixa temperatura de austenitização, que leva à formação de subgrãos ferríticos;
- Resfriamento inadequado após a austenitização, que promove incompleta formação da martensita;

- Alta temperatura de austenitização, que propicia a formação da fase ferrita delta.

Segundo Isfahany et al. (2011), o tempo de tratamento térmico depende muito das dimensões da peça e da microestrutura desejada. Quanto maior o tempo, maior a segurança da completa dissolução das fases para posterior transformação, e maior será o tamanho do grão. Os tempos de permanência no forno no presente trabalho foram os mesmos informados por Isfahany, de 30, 60 e 120 min para cada temperatura estabelecida. Todo tratamento foi realizado no Laboratório de Tratamento Térmico da EEIMVR.

Após passarem pela austenitização, as amostras foram retiradas do forno e passaram pela têmpera em água à temperatura ambiente. A Tabela 8 informa o processo detalhado.

Tabela 8 – Tratamento de Austenitização e Têmpera nas amostras do aço 410D

410D		
Austenitização		Têmpera
Temperatura (°C)	Tempo (min)	Tipo de Resfriamento
980	30	Imersão em água em temperatura ambiente
	60	
	120	
1015	30	
	60	
	120	
1050	30	
	60	
	120	

Fonte: (A autora, 2023)

4.2.3.2 Revenido

Ainda segundo Duarte (2015), o aço inoxidável martensítico é muito sensível a ciclos térmicos inapropriados de revenimento, com possibilidade de surgimento da martensita não revenida. Segundo Colpaert (2008) o aquecimento do aço na faixa entre 200°C e 600°C é suficiente para promover a solubilização de parte do carbono retido na estrutura da martensita, obtendo-se resultados positivos na melhoria dessas propriedades para o uso entre essa faixa de temperatura de revenimento. Quanto ao tempo de permanência, para peças pequenas (menores que uma polegada), o tempo de permanência pode ser utilizado como 60 min. Para peças maiores (maiores que uma polegada), acrescenta-se 60 min a mais por polegada (SILVA, Mariana, 2016).

As amostras foram submetidas ao tratamento de revenimento, onde passaram pelas temperaturas de 200°C e 400°C, tendo como tempo de permanência 60 min para cada uma das temperaturas, cada aço e cada tempo descrito na austenitização. Esse tratamento foi realizado no Laboratório de Caracterização Microestrutural localizado na EEIMVR, utilizando como resfriamento ar forçado. Foi utilizado o forno tipo mufla (Spencer), confeccionado em monobloco com capacidade de 1,7 litros e potência de 1500 W. Na Tabela 9, tem-se os processos que foram realizados no tratamento de revenido.

Tabela 9 – Tratamento de Revenido do aço 410D

410D		
Revenido		
Temperatura (°C)	Tempo (min)	Tipo de Resfriamento
200	60	Ar Forçado
400	60	Ar Forçado

Fonte: (A autora, 2023)

4.2.4 Preparação metalográfica das amostras

Seguido dos tratamentos térmicos, as amostras passaram pela etapa de preparação metalográfica a fim de se obter as micrografias desejadas de cada aço. A preparação metalográfica consiste em algumas etapas.

4.2.4.1 Embutimento a quente

A primeira etapa consiste no embutimento à quente, que foi realizado na embutidora semiautomática da fabricante Arotec com baquelite da marca Teclago. A embutidora fica localizada no Laboratório de Caracterização Microestrutural da EEIMVR.

4.2.4.2 Lixamento e Polimento

A segunda etapa é onde as amostras passam pelo processo de preparação da superfície - a de lixamento seguida de polimento. Essa etapa é de extrema importância e foi realizada

tendo como base o cuidado no manuseio a fim de que não ocorresse a contaminação dos metais. O processo de lixamento tem como objetivo de remover todos os danos causados pelo processo de corte, além de remover riscos provenientes dos procedimentos anteriores, até que estes estejam em uma profundidade que seja possível seu desaparecimento no processo seguinte de polimento.

No lixamento foi utilizada uma lixadeira metalográfica sob refrigeração (a água) da marca Arotec, também localizada no Laboratório de Caracterização Microestrutural. Foram utilizadas lixas d'água de carboneto de silício com as granulometrias de 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 e 2000 e as amostras passaram pelo seguinte procedimento:

- Uma pressão uniforme foi aplicada a fim de contribuir para formação de um único plano de desbaste na amostra;
- Foi mantido um fluxo de água que inibe a formação de pó, além de garantir um bom resfriamento da superfície da amostra;
- A cada mudança da lixa foi modificada a direção da lixa;
- Uma limpeza foi feita nas amostras após o lixamento a fim de remover quaisquer que sejam partículas.

O polimento é a etapa seguinte da preparação de amostras para análise micrográfica. O polimento assim como o processo de lixamento, tem como objetivo de remover camadas deformadas além de remover completamente todos os riscos presentes na amostra mesmo aqueles que sejam microscópicos. A politriz utilizada foi automática da fabricante Buehler que está disponível no Laboratório de Caracterização Microestrutural. Nessa etapa de polimento utilizou-se de 2 modos. Primeiramente, para as amostras que passaram pelo tratamento térmico de austenitização e têmpera, um pano de polimento foi utilizado, juntamente com lubrificante para polimento de ferrosos com pasta de diamante da marca Teclago e uma pasta de diamante da marca Aka-Paste GP de granulometria de 0,25 μm . O tempo de polimento utilizando a pasta de diamante foi de 30 min. Após isso foi utilizada uma sílica coloidal da marca Buehler durante 5 min. Com as amostras que passaram pelo tratamento de revenimento, as mesmas foram polidas com alumina da marca Arotec de 1 μm durante 15 min, seguido do mesmo processo da anterior, de um polimento com sílica coloidal durante 5 min. Todas as etapas do polimento foram realizadas com rotação de 60 rpm e força de 20 N.

4.2.4.3 Ataque

Com o objetivo da visualização da microestrutura do material, a amostra foi submetida a mecanismos de criação de contrastes tornando assim possível a visualização de sua microestrutura. O ataque químico tem como objetivo revelar a microestrutura de uma amostra sob a luz de microscópio ótico utilizando reagentes químicos. Segundo Colpaert (2008), os ataques químicos criam uma superfície que reflete a luz em diferentes direções, estes desvios causados na luz incidente podem ser causados por um desnível, por uma deposição de camada ou pela orientação dos cristais.

Nas amostras que passaram apenas por austenitização e têmpera foi realizado ataque eletrolítico em solução aquosa de ácido nítrico (40 vol% HNO_3 e 60 vol% H_2O), com potencial de 2,2 V durante aproximadamente 1 minuto. Já nas amostras que passaram pelo tratamento de revenimento, foi realizado ataque por imersão com o reagente Vilella (5ml de ácido clorídrico, 2g de ácido pícrico e 100 ml de etanol), sendo o tempo de imersão de aproximadamente 25 segundos.

4.2.5 Microscopia ótica

A análise através da microscopia ótica é útil na quantificação e caracterização do material. Com as amostras devidamente preparadas seguindo todas as etapas descritas, as mesmas tiveram sua microestrutura visualizada utilizando a técnica de microscopia ótica. Para isso, foi utilizado um microscópio ótico disposto de câmera fotográfica digital Olympus, modelo BX51RF localizado no laboratório de Microscopia e Preparação de Amostras Metalográficas da EEIMVR e software analisador Stream Basic2. Em cada uma das amostras foram obtidas 10 micrografias de áreas distintas.

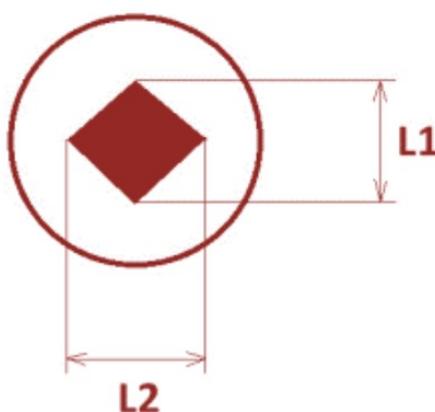
4.2.6 Caracterização Mecânica

4.2.6.1 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado com objetivo de avaliar, de forma geral, o impacto do tratamento térmico nas propriedades mecânicas do material e permitir comparação com dados de dureza encontrados na literatura.

A fim de verificar a dureza do material, foi realizado o ensaio de microdureza na escala Vickers. O teste de Dureza Vickers pode ser executado nas escalas de dureza micro e macro. Foi utilizado para o teste, o microdurômetro da fabricante Shimadzu, que se localiza no Laboratório de Caracterização Microestrutural da EEIMVR, com penetrador em formato de pirâmide de diamante de base quadrada com ângulo de 136° entre as faces. 30 medidas de microdureza, foram realizadas utilizando carga de 0,5 kgf (4,903 N) no tempo de 15 segundos para relaxação e acomodação das deformações. Após o penetrador ser retirado da amostra, a forma de impressão é a de um losango regular que no caso foram medidos os comprimentos das duas diagonais (L1 e L2) e o próprio equipamento calcula e fornece o valor medido da dureza Vickers. A figura 29 mostra as diagonais L1 e L2 do losango.

Figura 29 - Diagonais L1 e L2 do losango formado pelo ensaio de Microdureza Vickers



Fonte: (A autora, 2023)

4.2.6.2 Ensaio de Corrosão

Os ensaios eletroquímicos foram realizados com o objetivo de definir a curva de polarização cíclica para os materiais em suas diferentes condições de tratamentos, possibilitando assim determinar os parâmetros do comportamento eletroquímico do material.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Eletroquímica na Universidade Federal Fluminense (UFF). Foi utilizado o potenciostato da marca Em Stat³⁺ ligado a um computador para leitura das curvas de polarização cíclica através do software PsTrace versão 4.2. Assim, podem-se obter as curvas de polarização experimentais, que representam a relação entre o potencial de eletrodo aplicado e a corrente correspondente medida no potenciostato (WOLYNEC, 2003).

4.2.6.2.1 Preparação da Amostra para ensaio de corrosão

Essa preparação tem por objetivo eliminar riscos, marcas mais profundas e a camadas de óxidos da superfície dando um acabamento. As amostras foram lixadas através de lixas d'água de carboneto de silício de granulometria de 320, 400 e 1200. Após o lixamento as amostras foram lavadas com água deionizada. Todo processo foi realizado visando o mínimo contato possível com as amostras, a fim de que não ocorresse a contaminação das mesmas. O lixamento foi realizado também seguindo o procedimento correto para que não ocorresse marcas de lixa impróprias no material.

4.2.6.2.2 Solução

O comportamento do pite em aços inoxidáveis tem sido estudado mais extensivamente em ambientes contendo íons agressivos similares aos encontrados em ambientes operacionais. A maioria dos trabalhos tem sido feitos em soluções contendo íons agressivos de cloreto, pois estes são comumente encontrados em ambientes com água do mar, bombas e processamento de papel, e indústrias químicas em geral (NESIC, 2007). Acredita-se que os cloretos são os ânions mais agressivos quando da corrosão por pite em aços inoxidáveis (GEMELLI, 2001). A presença de uma alta concentração de cloretos pode agravar o processo de corrosão por formação de pites. Os cloretos são conhecidos por serem altamente corrosivos para muitos tipos de aços, incluindo os martensíticos. Isso torna os ensaios com cloreto uma maneira rigorosa de avaliar a resistência à corrosão desses materiais, permitindo identificar quaisquer fraquezas em sua composição ou tratamento térmico. (CAREY, 2007).

A dissolução da camada passivadora, pode ocorrer diante da presença de qualquer um dos haletos (F, Cl, Br e I). Porém devido a sua maior presença na atmosfera terrestre, o íon cloreto é o mais estudado (GENTIL, 2011).

Conforme Carey (2007), nos ensaios de corrosão em aços inoxidáveis no geral são utilizadas soluções contendo cloretos que tem como objetivo simular a água do mar e que são responsáveis pela destruição da camada passivadora do aço interferindo na proteção à corrosão por pites ou até mesmo generalizada. Nesse caso, a fim de se verificar o máximo de ataque de corrosão, utilizou-se o NaCl.

A solução utilizada para a realização do ensaio de corrosão foi 1 mol/L de NaCl. Foram dissolvidos 58,66 gramas de NaCl em 1 litro de água deionizada.

4.2.6.2.3 Célula Eletroquímica, eletrodo e eletrólito

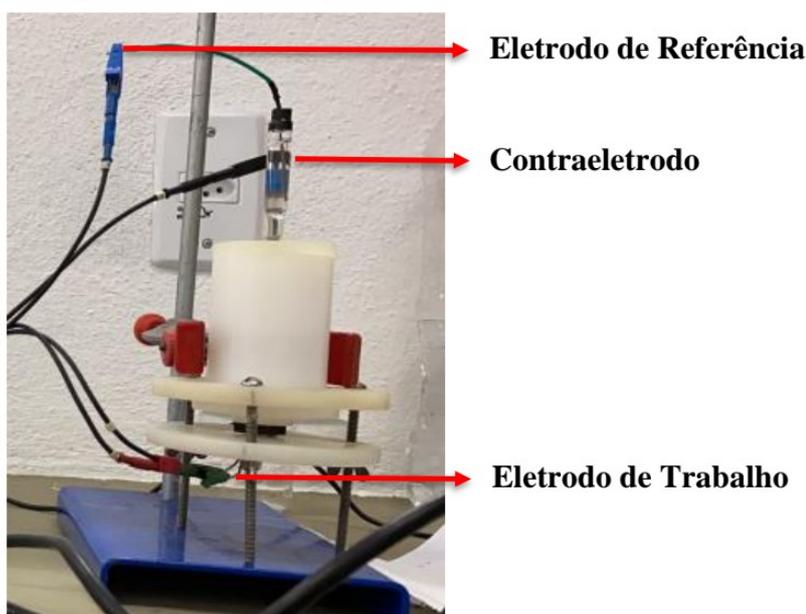
O ensaio foi realizado a partir de uma célula eletroquímica, sendo que foi utilizado um sistema composto por três eletrodos, sendo, um eletrodo de referência, contraeletrodo e o eletrodo de trabalho.

Para o eletrodo de referência, utilizou-se o Ag/AgCl/KCl_{sat} saturado, o qual é constituído por um fio de prata recoberto eletroliticamente por uma camada de cloreto de prata, imerso em solução de cloreto de potássio saturada, envolto por um tubo de vidro e soldado a um fio condutor. O contraeletrodo utilizado foi um fio de platina soldado a um fio condutor de cobre responsável pelo contato elétrico, contido em um tubo de vidro. O eletrodo de trabalho é constituído do metal cujo potencial de corrosão será medido. Como eletrólito foi utilizado a solução de 1 mol/L de NaCl em água deionizada. As quantidades em gramas necessárias de NaCl foram mensuradas em uma balança analítica.

Todo ensaio foi conduzido em temperatura ambiente (~25°C) e após cada ensaio a solução era devidamente descartada e substituída por uma nova, visando evitar a contaminação do metal. Nesse ensaio foram realizadas duplicatas em cada amostra. A amostra foi colocada cuidadosamente na célula e permaneceu em contato com um metal onde o eletrodo de trabalho é acoplado. A área da amostra que entra em contato com o eletrólito é de 1cm² em seção circular.

Para melhor entendimento a Figura 30, representa a célula eletroquímica e a posição de seus eletrodos a qual foi utilizada nesse trabalho.

Figura 30 – Célula Eletroquímica



Fonte: (A Autora, 2023)

As amostras foram colocadas uma a uma na célula que é fixada no eletrodo de trabalho e possui uma abertura para que o material possa entrar em contato com o eletrólito (solução de 1 mol/L de NaCl). A região de contato entre a amostra e o eletrodo de referência é definida por meio de um orifício central presente na célula e para a vedação e nesse orifício foi utilizado um anel de borracha (o'ring).

O potencial em circuito aberto (OCP) do eletrodo de trabalho que tem como objetivo estabilizar a superfície no eletrólito, foi medido por exatamente 1800 segundos (30 min) antes da realização do experimento de polarização potenciodinâmica. Após o teste OCP a curva de polarização potenciodinâmica foi realizada e a mesma permaneceu em um tempo de aproximadamente 2400 segundos (40 min). Todas as curvas foram geradas com o auxílio do software PSTrace 4.2, que possui a função de salvar a curva em seu programa ou exportá-la em excel. Posteriormente as curvas salvas em excel, foram plotadas em gráficos através do software para análise de dados e estatística chamado Origin® 2018. Esse software oferece ferramentas para operações das mais variadas para análise de dados.

Na tabela 10, tem-se os parâmetros detalhados que foram utilizados nos testes.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados nos testes OCP e CP

Parâmetros	
Tempo de ensaio (OCP)	1800 s
Tempo de ensaio (CP)	2400 s
Velocidade de Varredura	1 mV/s
Área exposta do corpo de prova	1 cm²
Faixa de potencial	-200 mV a + 800 mV
Eletrólito	1 mol/L de NaCl
Eletrodo de referência	Ag/AgCl/KCl saturado
Contraeletrodo	Fio de platina (Pt)
Eletrodo de trabalho	410D

Fonte: (A autora, 2023)

4.2.6.3 Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As amostras foram caracterizadas após os ensaios eletroquímicos, em MEV modelo EVO MA 10, marca Carl ZEISS que fica localizado no Laboratório Multiusuário de Microscopia

Eletrônica na EEIMVR - UFF. A análise foi realizada utilizando sinal de elétrons secundários (SE1), tensão de feixe de elétrons (ETH) de 20,00 kV com distância de trabalho de 9 mm e magnitude variando de 100 a 5000 vezes.

4.2.6.4 Microanálise EDS

A Espectrometria por Dispersão de Energia (do inglês, Energy Dispersive Spectrometry – EDS) é uma técnica utilizada para caracterizar componentes químicos geralmente de forma qualitativa e, por vezes, quantitativa. Esse método é o mais utilizado atualmente, principalmente por ser rápido, pois os raios-X característicos de todos os elementos da amostra são varridos simultaneamente (BRANDON et al, 2008).

As amostras selecionadas dos resultados anteriores passaram por uma análise em diferentes pontos de modo aleatório, tendo em vista, obter imagens com definição em função da profundidade da microestrutura. Como forma de identificar a composição química presente em diferentes zonas da microestrutura do aço estudado, além de identificar a ocorrência dos compostos intermetálicos precipitados na matriz, foi utilizada a microanálise EDS ligada às imagens do MEV.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico estão apresentados os resultados obtidos no trabalho assim como discussões pertinentes.

5.1 Caracterização mecânica e microestrutural do material

5.1.1 Material como recebido

Foi utilizado como caracterização mecânica o ensaio de dureza Vickers. Após o ensaio, foi gerado o valor em seu estado inicial ao aço 410D. Como pode-se observar na tabela 11, o aço 410D possui menor dureza quando comparado com a literatura de outros aços como exemplo o 420A que possui dureza de $199 \pm 2,92$ HV. Essa diferença se dá devido a % de C presente nos mesmos, sendo o 410D com menor % e o 420A com maior % (Pinedo, 2000).

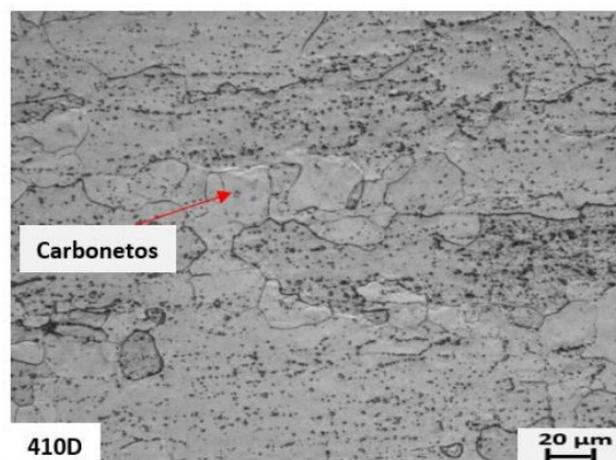
Tabela 11 - Dureza Vickers (HV) do aço 410D

<i>Dureza Vickers</i>	
<i>AÇO</i>	<i>HV</i>
410D	$158 \pm 2,31$

Fonte: (A autora, 2023)

A micrografia da amostra como recebida também foi gerada logo após sofrer o ataque com reagente Vilella. Nela, observa-se uma microestrutura composta de carbonetos esferoidizados dispersos por toda matriz ferrítica. A figura 31 mostra a micrografia do aço 410D como amostra recebida.

Figura 31 - Microestrutura da amostra CR – 410D – aumento de 500x



Fonte: (A autora, 2023)

Segundo Corrêa et al, (2017), a precipitação destes carbonetos depende do teor de carbono, do tempo e da temperatura empregados no tratamento térmico e se dá na respectiva ordem em que foram apresentados. No estado inicial (Figura 31), os carbonetos presentes podem ser resultantes de processamentos mecânicos metalúrgicos empregados na fabricação do material.

5.1.2 Material após Austenitização e Têmpera

As amostras após serem austenitizadas em três temperaturas distintas e submetidas ao processo de têmpera em água, apresentaram os seguintes resultados de dureza Vickers, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Dureza Vickers (HV) do aço 410D após passar por austenitização e têmpera

Austenitização e Têmpera			
	30min	60min	120min
980°C	327±3,63	311±3,27	318±2,67
1015°C	353±3,52	341±6,18	329±3,17
1050°C	404±6,25	311±2,15	302±2,53

Fonte: (A autora, 2023)

Após esses tratamentos já se nota um aumento significativo da dureza comparado a dureza inicial apresentada na Tabela 11. Estudos de Krauss (1999), revelaram que a dureza está diretamente ligada a porcentagem de carbono, sendo, quanto maior essa %, maior a dureza

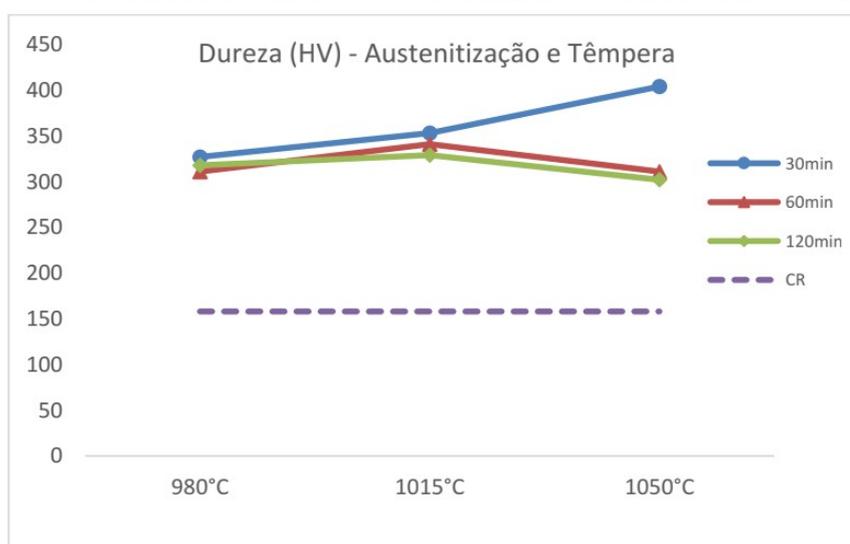
encontrada. O aço 410 D por possuir menor quantidade de C, automaticamente não apresenta durezas tão elevadas em comparação a outros aços martensíticos da família 400. Isso se deve ao fato de que, maior quantidade de C disponível permite maior distorção da rede da martensita contribuindo assim para uma maior dureza. Ainda segundo Krauss (1999), a quantidade de austenita retida podem também afetar a dureza, uma vez que a quantidade de austenita retida aumenta acentuadamente com o aumento do teor de carbono.

Segundo Kumar (2019), a média de dureza utilizada na indústria para o aço martensítico 410D pode variar dependendo da aplicação específica e dos requisitos do projeto. No entanto, é comum encontrar faixas de dureza acima de 35 HRC para o aço 410D. Essa faixa de dureza oferece uma boa combinação de resistência mecânica e tenacidade para muitas aplicações industriais. De acordo com a tabela 12, na temperatura de 1050°C a 30 min o material possui dureza de 404 HV (41 HRC), seguida da dureza de 353 HV (36 HRC), com temperatura de 1015°C a 30 min comprovando que os mesmos atenderiam a faixa citada por Kumar.

Pode-se verificar que de uma forma geral, a temperatura que possui as menores durezas é a de 980°C conforme Tabela 12. Segundo Moreira (2021), uma explicação para tal fenômeno é de que os carbonetos não dissolvidos nesta temperatura deixaram a matriz martensítica pobre de carbono, e a dureza aumenta à medida em que a temperatura de austenitização também é aumentada, pois dessa forma é possível ter mais carbono dissolvido na martensita, provocando assim maior distorção da rede.

O Gráfico mostrado na Figura 32, demonstra os resultados de dureza obtidos, comparando-se os tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de 980, 1015 e 1050°C.

Figura 32 - Comparação dos valores de Dureza (HV) em diferentes tempos e temperaturas



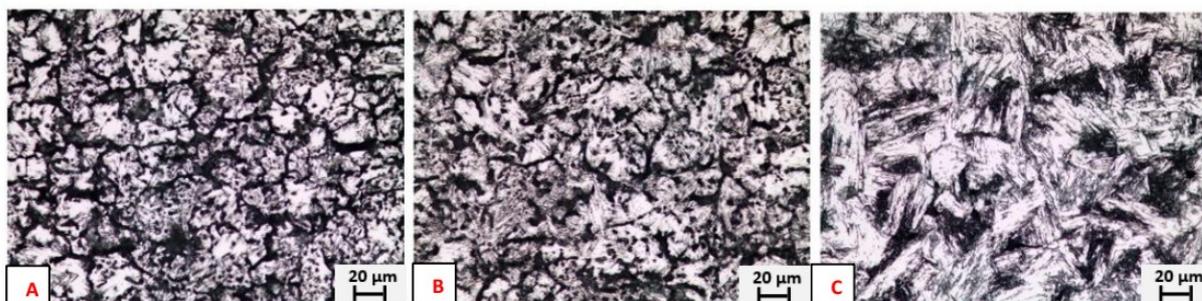
Fonte: (A autora, 2023).

Na Figura 32, observa-se que o aumento da dureza se dá em todas as condições que foram empregadas, em comparação a amostra como recebida (Tabela 11). Conforme Bhadeshia (2012), após a austenitização e têmpera, o aumento da dureza pode ser relacionado com o aumento da quantidade de elementos de liga solubilizados, que compõem a nova matriz de austenita alcançada com a elevação da temperatura do material. Durante o resfriamento promovido pelo tratamento de têmpera esses elementos de liga que se solubilizam na matriz compõem então uma martensita que pode apresentar consideráveis distorções no reticulado e aumento da dureza.

As micrografias das amostras presentes nas Figuras 33 a 35 apresentam de forma geral uma microestrutura martensítica fina tipo ripas, com alguns carbonetos esferoidizados e dispersos nesta matriz, quando comparado com a microestrutura das amostras como recebida (Figura 31).

Na temperatura de austenitização de 980°C (Figura 33) pode-se ver uma microestrutura com grãos austeníticos nos tempos de 30 min (Figura 33 a) e 60 min (Figura 33 b). Já no tempo de 120 min (Figura 33 c) pode-se observar o início da formação de martensita (ripas). Através da Tabela 12, nota-se que há um decréscimo de dureza do tempo de 30 min para o de 60 min. Isso pode ser justificado por um ligeiro aumento no tamanho de grão (Figura 33 de a para b).

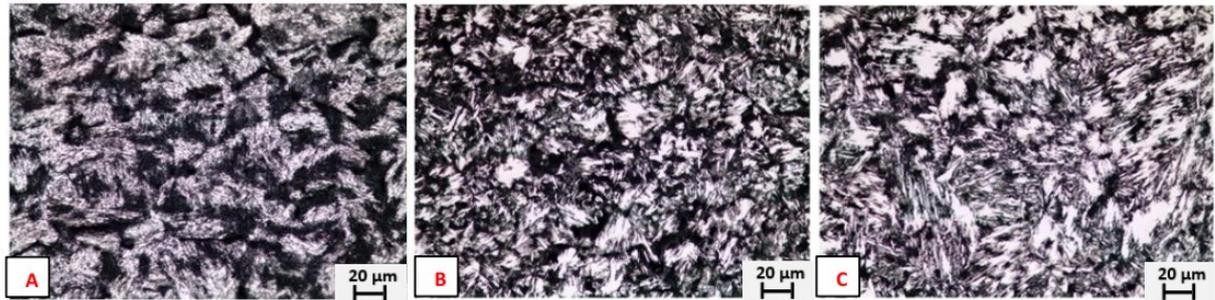
Figura 33 - Amostras austenitizadas e temperadas à 980°C (500x) – a) por 30 min, b) por 60 min, c) por 120 min



Fonte: (A autora, 2023)

Para a temperatura de 1015°C em 30 min (Figura 34 a), observa-se grãos austeníticos com início de ripas de martensita. Para o tempo de 60 min há o início de formação de ripas, e no tempo 120 min pode-se ver maior formação da martensita, conforme demonstra a Figura 34 b e c respectivamente. A dureza nessa temperatura tende a cair de acordo com o tempo de encharque. Quando há o aumento no tempo de encharque, os grãos tendem a crescer, diminuindo assim sua dureza.

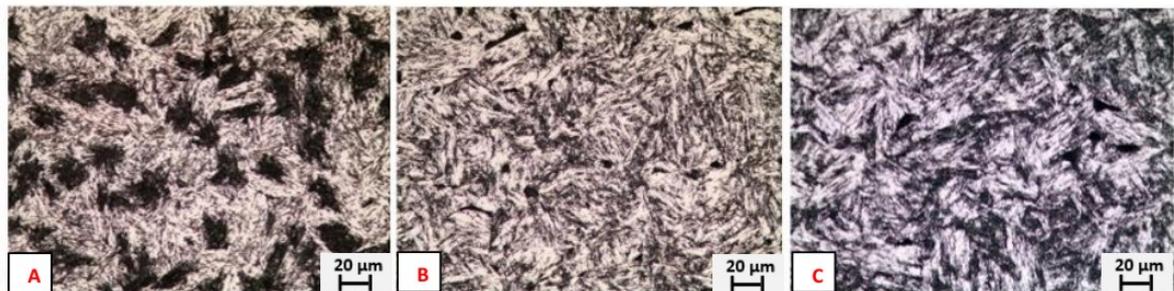
Figura 34 - Amostras austenitizadas e temperadas à 1015°C (500x) – a) por 30 min, b) por 60 min, c) por 120 min



Fonte: (A autora, 2023)

Uma maior formação de martensita se nota na temperatura de 1050°C mesmo nos tempos de 30, 60 e 120 min (Figura 35 a, 35 b, 35 c) respectivamente. Nota-se também que a presença maior de martensita ocorre em função do tempo, ou seja, quanto maior a exposição da amostra em uma temperatura específica, maior a transformação de fase ferrítica em austenítica e, maior formação de martensita, mantendo austenita retida (parte mais clara), como pode-se verificar nas (Figuras 33 c, 34 c e 35 c), pelos tempos de 120 min.

Figura 35 - Amostras austenitizadas e temperadas à 1050°C (500x) – a) por 30 min, b) por 60 min, c) por 120 min



Fonte: (A autora, 2023)

Pelas microestruturas que foram apresentadas (Figuras 33 a 35), observa-se que as amostras no geral, que foram austenitizadas e temperadas formam martensita e mantém austenita retida. Quanto mais elevada a temperatura de austenitização, mais energia é empregada para o crescimento de grão, o que faz com que a estrutura formada possua grãos maiores e comparando as temperaturas, observa-se que a mesma também possui influência, uma vez que com 980°C no tempo de 30 min (Figura 33 a) não se percebe tanto a presença de martensita, mas já na temperatura de 1015°C (Figura 34 a) começa a notar uma pequena

presença de martensita, o que fica muito mais visível na de 1050°C mesmo a 30 min (Figura 35 a).

Segundo Pinedo (2004), a relação com o aumento da temperatura de austenitização se dá devido ao aumento da dissolução de carbonetos de Cr, o que faz com que se eleve seu teor na matriz, e aumentando o grau de saturação da martensita.

5.1.3 Material após Austenitização, Têmpera e Revenido

As amostras foram austenitizadas em três temperaturas distintas e submetidas ao processo de têmpera em água, passaram pelo revenido nas temperaturas de 200°C e 400°C com tempo de permanência de 60 min e foram resfriadas com ar forçado. As Tabelas 13 e 14 apresentam os seguintes resultados de dureza Vickers (HV) para amostras revenidas à 200°C e 400°C respectivamente.

Tabela 13 - Dureza Vickers (HV) do aço 410D após passar por austenitização, têmpera e revenido à 200°C

Revenido 200°C			
	30min	60min	120min
980°C	297±3,84	294±2,76	287±2,26
1015°C	334±2,90	336±3,16	299±3,16
1050°C	327±2,7	299±2,86	301±2,93

Fonte: (A autora, 2023)

Tabela 14 - Dureza Vickers (HV) do aço 410D após passar por austenitização, têmpera e revenido à 400°C

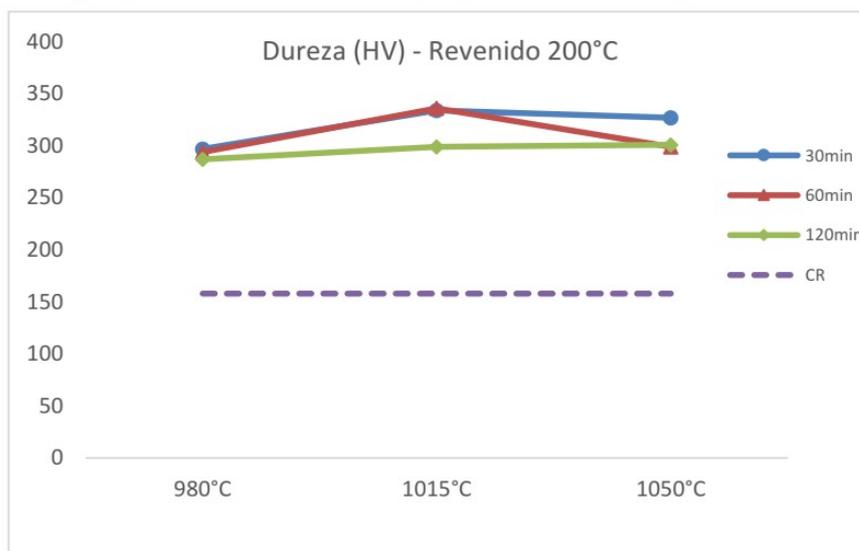
Revenido 400°C			
	30min	60min	120min
980°C	304±2,17	288±3,43	298±2,75
1015°C	336±3,47	337±3,5	319±3,30
1050°C	325±5,04	310±3,35	302±3,92

Fonte: (A autora, 2023)

Observa-se que, no revenido a 200°C (Tabela 13), há uma pequena variação da dureza comparando-a com a de 400°C (Tabela 14). Segundo Porter (2009), isso se dá devido à precipitação de finos carbonetos ricos em Fe que são metaestáveis e conforme há o aumento dessa precipitação, a martensita se empobrece, o que causa a perda da tetragonalidade da martensita.

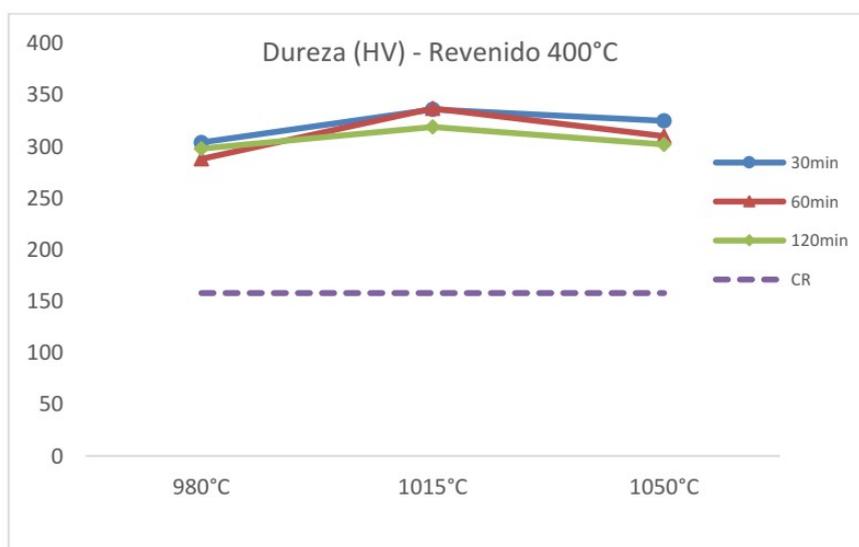
De forma geral a dureza se mantém constante, não tendo uma mudança significativa na mesma. No revenido à 200°C observa-se um pequeno decréscimo da dureza em 1050°C 60 min (Figura 36). É possível verificar que praticamente não houve variação nas amostras de revenido à 400°C (Figura 37), apenas um leve decréscimo na temperatura de 1050°C no tempo de 60 e 120 min.

Figura 36 - Comparação dos valores de Dureza (HV) austenitizadas, temperadas e revenidas à 200°C



Fonte: (A autora, 2023).

Figura 37 - Comparação dos valores de Dureza (HV) austenitizadas, temperadas e revenidas à 400°C

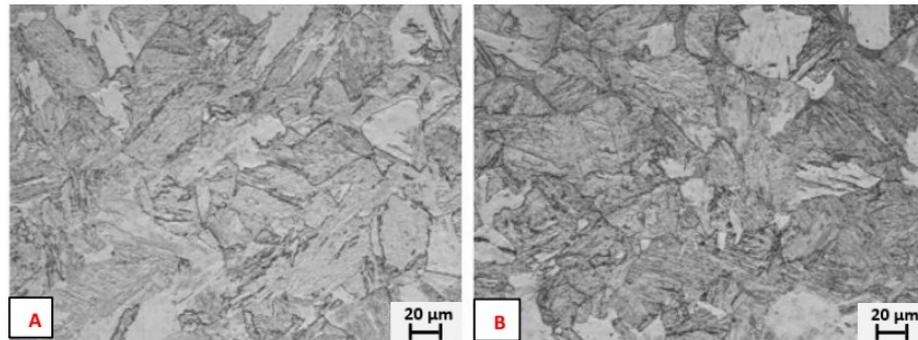


Fonte: (A autora, 2023).

Na Figura 38 é possível visualizar que não há uma mudança significativa da microestrutura na temperatura de 1015°C no tempo de 60 min com revenido à 200°C e 400°C

(Figura 38 a e b respectivamente). No caso do revenimento, parte da martensita é transformada em martensita revenida.

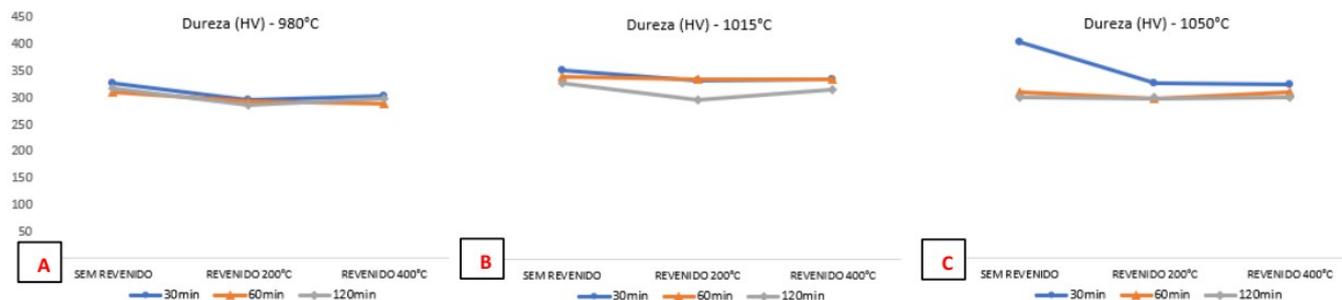
Figura 38 - Amostra austenitizada e temperada 1015°C por 60 min, revenida a) à 200°C e b) à 400°C



Fonte: (A autora, 2023)

Já é de conhecimento que a amostra como recebida (tabela 11) possui menor dureza. Para uma maior verificação da dureza com o tratamento de austenitização e têmpera e da dureza com o tratamento de austenitização, têmpera e revenido à 200°C e 400°C, a Figura 39 faz uma comparação desses 3 processos nas 3 temperaturas diferentes.

Figura 39 - Comparação dos valores de dureza (HV) das amostras sem revenido, com revenido à 200°C e à 400°C em temperaturas de a) 980°C b) 1015°C e c) 1050°C



Fonte: (A Autora, 2023)

Após a verificação das amostras (Figura 39), observa-se que em geral, o menor valor de dureza ocorreu na temperatura de austenitização de 980°C (Figura 39 a), sugerindo que os carbonetos não dissolvidos nesta temperatura deixaram a matriz martensítica pobre de carbono, sendo assim, a dureza aumenta à medida em que se aumenta a temperatura de austenitização. O ápice da dureza foi encontrado na temperatura de austenitização de 1050°C no tempo de 30 min (Figura 39 c), sem o tratamento de revenido. Esse aumento de dureza pode ser explicado pela maior concentração de carbono e de elementos de liga na solução sólida austenítica, que é

gerada devido aos carbonetos serem mais diluídos durante o aquecimento e encharque responsável pela liberação de carbono.

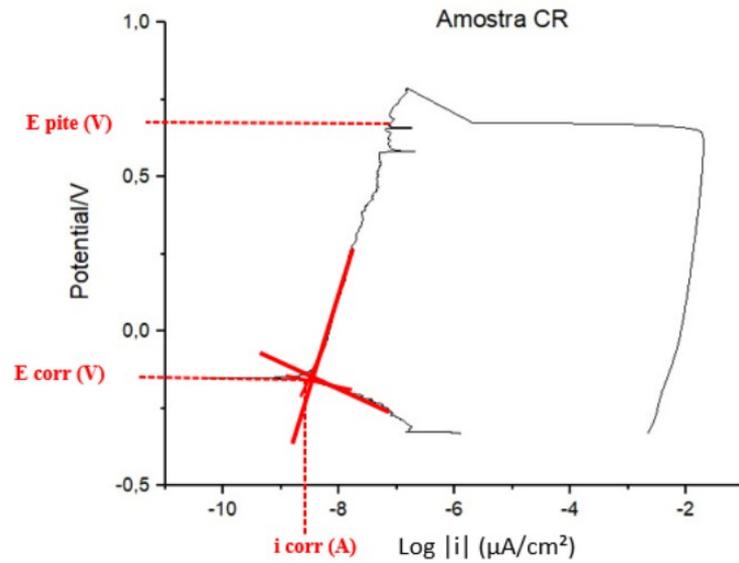
5.2 Ensaios Eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos foram realizados com o objetivo de definir a curva de polarização cíclica, possibilitando assim determinar seu potencial de pite, corrosão, entre outros parâmetros. Todos os ensaios independentemente se passaram pelos tratamentos térmicos ou não (amostra CR), foram realizados com 1 mol/L de NaCl, sendo o eletrólito descartado em cada etapa para que não houvesse a contaminação das amostras. Todas as amostras também foram lixadas após cada análise realizada. Outro fator é que antes do teste da curva de polarização cíclica, o material passou pelo teste de polarização cíclica e foram realizados experimentos de OCP durante 30 min com o objetivo de estabilização da superfície do eletrólito. O foco principal dessa seção serão as curvas de polarização cíclica bem como todos os parâmetros como i_{corr} , i_{pass} , E_{pite} , E_{corr} e E_{pass} , bem como os resultados obtidos com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Todos os gráficos, bem como os dados gerados deles, foram obtidos com o auxílio do software Origin® 2018.

5.2.1 Resistência à corrosão do Material como recebido

Antes de dispor as amostras que passaram pelos tratamentos térmicos, se faz necessário demonstrar o gráfico de polarização da amostra como recebida, livre de qualquer tratamento térmico. A figura 40 mostra o gráfico contendo a curva de polarização, bem como os pontos onde estão localizados os parâmetros E_{pite} , i_{corr} e E_{corr} . A Tabela 15 mostra os principais pontos obtidos com o gráfico.

Figura 40 - Curva de Polarização Cíclica aço 410D – amostra como recebida



Fonte: (A autora, 2023)

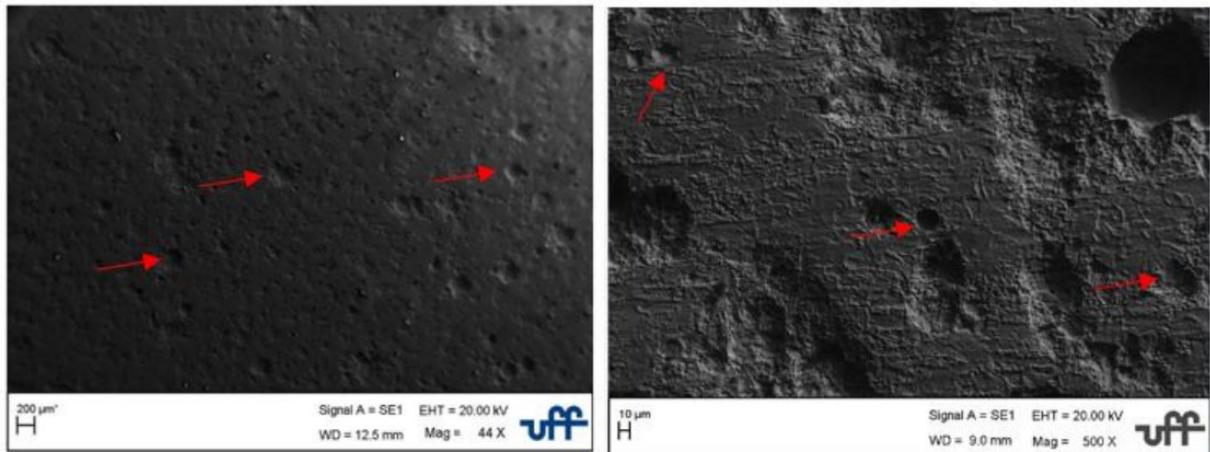
Tabela 15 - Dados obtidos do Gráfico de Polarização Cíclica aço 410D – amostra como recebida

	Amostra CR
I_{corr} (nA/cm ²)	0,0000030
E_{pite} (V)	0,6621
E_{corr} (V)	-0,1469
$\Delta E_{pite} = E_{pite} - E_{corr} $	0,8090

Fonte: (A autora, 2023)

Os dados obtidos de densidade de corrosão (I_{corr}) foram convertidos de μA para nA a fim de facilitar a visualização no quesito de casas decimais. Através dos dados obtidos da tabela 15, bem como a visualização do gráfico na Figura 40, verifica-se que sem tratamento térmico, a amostra sofre a corrosão por pites, e isso se deve ao fato da amostra ter em sua composição, microestrutura ferrítica e carbonetos dispersos (Figura 31). O elemento Cr, que confere ao aço inoxidável a resistência à corrosão, estando sob a forma de carbonetos, empobrece a liga deixando-o menos resistente a corrosão. As setas da Figura 41 mostram as imagens dos pites aparentes devido a corrosão.

Figura 41 - Fotomicrografia (MEV) de amostra como recebida com pites aparentes em 44x à esquerda e 500x à direita

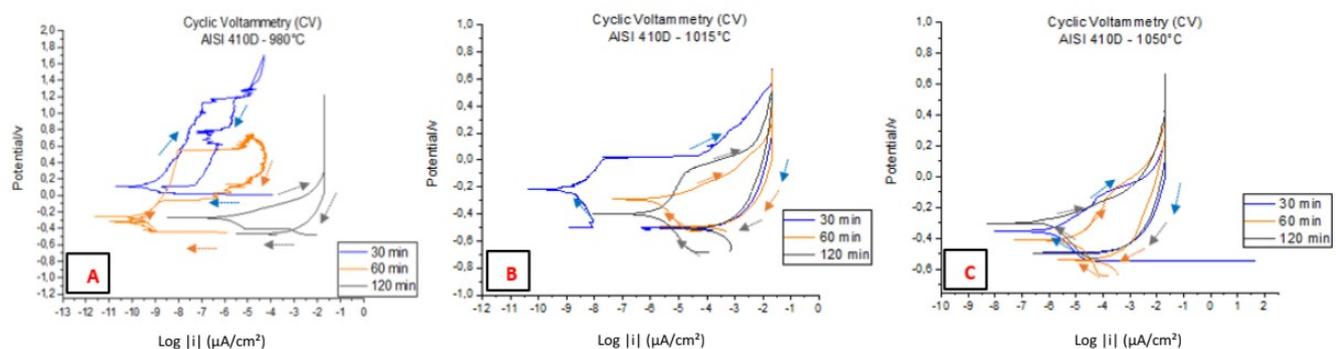


Fonte: (A autora, 2023)

5.2.2 Resistência à corrosão após Austenitização e Têmpera

Os resultados dos ensaios de corrosão com solução de 1 mol/L de NaCl obtidos após o tratamento térmico em 3 temperaturas de austenitização e têmpera para o aço 410D, estão dispostos nesta seção, conforme Figura 42 e Tabela 16.

Figura 42 - Curva de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas e temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de a) 980°C, b) 1015°C e c) 1050°C



Fonte: (A autora, 2023).

Tabela 16 - Dados obtidos do Gráfico de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas e temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de 980°C, 1015°C e 1050°C

	980°C			1015°C			1050°C		
	30 min	60 min	120 min	30 min	60 min	120 min	30 min	60 min	120 min
I corr (nA/cm ²)	0,0000006	0,0000001	0,0010160	0,0000024	0,0018544	0,0016554	0,0010644	0,0059786	0,0006767
I Pass (nA/cm ²)	-	0,0000008	-	0,0000105	0,7798301	0,0051773	-	0,0373	-
E pite (V)	1,3180	0,5470	-	0,0277	0,0396	-0,0718	-	-0,2308	-
E corr (V)	0,1074	-0,3202	-0,2724	-0,2207	-0,2915	-0,4007	-0,3372	-0,4122	-0,3043
E pass (V)	-	-0,1538	-	-0,0990	-0,1964	-0,2716	-	-0,3238	-
E prot (V)	-	-0,2605	-0,4701	-0,5054	-0,4958	-0,5178	-0,4800	-0,5700	-0,4969
ΔEpite = Epite - Ecorr	1,2106	0,8672	-	0,2484	0,3311	0,3289	-	0,1814	-
Região de Histerese (V)*	-	0,8075	-	0,5331	0,5354	0,4460	-	0,3392	-
Grau de proteção (V)*	-	0,0597	0,1977	0,2847	0,2043	0,1171	0,1428	0,1578	0,1926

*ΔEpite (V) = |Epite - Ecorr|

*Região de Histerese (V) = |Epite - Eprot|

*Grau de proteção (V) = |Ecorr - Eprot|

Fonte: (A autora, 2023).

As setas nos gráficos da Figura 42, indicam o sentido que ocorre a polarização, as cores são de acordo com o tempo de encharque (30, 60 e 120 min – azul, laranja e preto respectivamente). Todos os gráficos foram gerados em excel e plotados com o auxílio do Origin ® 2018 e seus valores foram obtidos no próprio Origin fazendo uso da reta Tafel. A Tabela 16 mostra alguns parâmetros como o ΔEpite, que tem como objetivo mostrar a resistência à corrosão por pite do material, comparando-se o potencial de pite e o potencial de corrosão. De modo geral, quanto maior a diferença absoluta entre estes dois parâmetros menos provável é o surgimento destes pites na superfície metálica. Outro parâmetro mostrado é a região de histerese e de acordo com Tait (1994) e Gonzalez Fernandez (1989), quanto menor for a diferença entre o potencial de pite e o potencial de proteção, a liga se torna mais resistente à corrosão por pite. Nesse caso, nota-se pelos dados da tabela 16 que foram obtidos do gráfico (Figura 42) que nem todas as curvas apresentam o potencial de proteção ou mesmo dados como potencial de pite. O terceiro parâmetro obtido na tabela 16 é o grau de proteção, que tem como objetivo mostrar a possibilidade de repassivação dos pites formados, comparando-se os potenciais de corrosão e de proteção do material. O grau de proteção na corrosão pode variar dependendo do ambiente corrosivo e do material em questão. Alguns sistemas de classificação e padrões são utilizados para categorizar o grau de proteção oferecido por diferentes materiais ou métodos de proteção contra corrosão. Ainda segundo Gonzalez Fernandez (1989), quanto maior a diferença absoluta entre o potencial de proteção e o potencial de corrosão, mais fácil será a repassivação do pite formado.

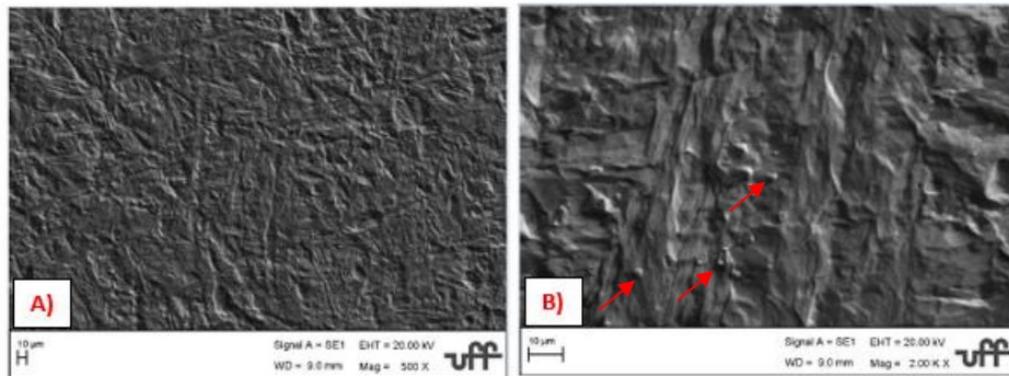
Pela Figura 42, verifica-se que algumas curvas possuem o comportamento parecido da amostra como recebida (Figura 40). É o caso da Figura 42 b de 30 minutos a 1015°C, onde há a quebra da camada do filme passivo e um aumento da corrente. A maioria dos valores, como

E pite, I pass e E pass só é possível obter quando a curva é característica com a da amostra recebida (Figura 40) e como a Figura 24 apresentada por MAGNABOSCO.

Na Figura 42 c, tem-se gráficos nos tempos de 30 min e 120 min e estes seguem basicamente o mesmo padrão, onde as curvas sobem e depois voltam. A Figura 43 e 44 demonstram as fotomicrografias dessas amostras.

Figura 43 - Fotomicrografia (MEV) da amostra austenitizada, temperada à 1050°C em 30 min a) 500 x, b) 2000

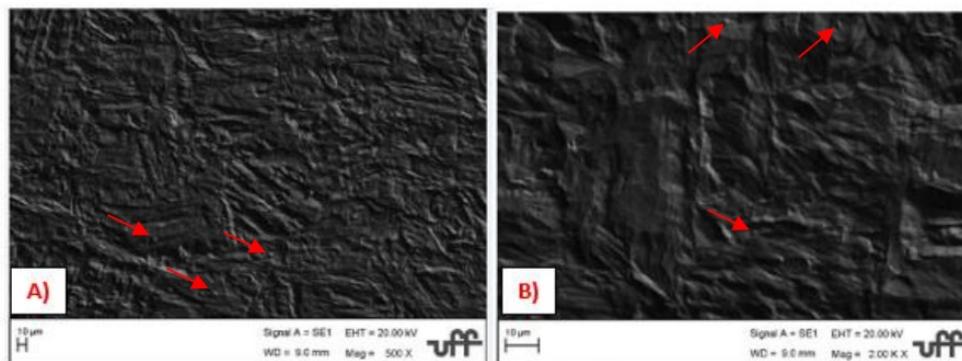
x



Fonte: (A autora, 2023).

Figura 44 - Fotomicrografia (MEV) da amostra austenitizada, temperada à 1050°C em 120 min a) 500x, b)

2000x



Fonte: (A autora, 2023).

Pela figura 43 observa-se apenas agulhas de martensita, com ausência de pites, o mesmo se encontra na figura 44, onde não se encontra pite. As setas em vermelho indicam os carbonetos que não foram dissolvidos.

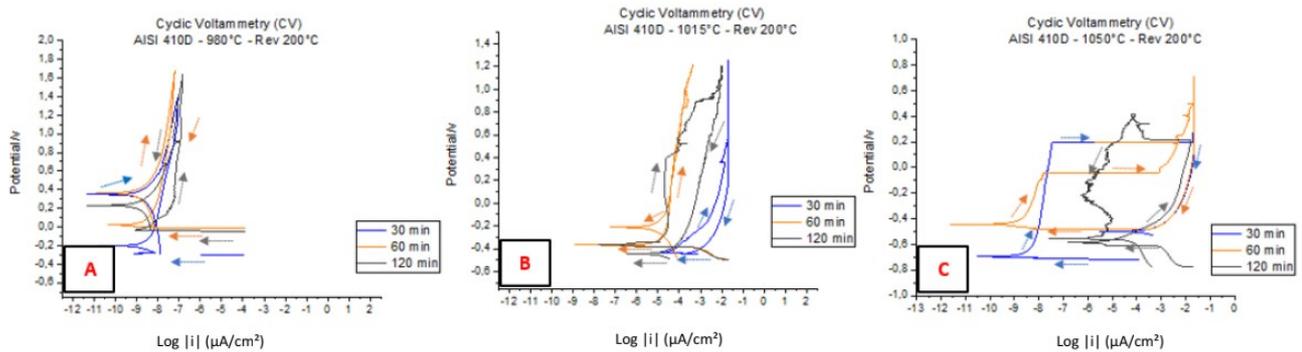
5.2.3 Resistência à corrosão após Revenimento

Nesta seção são apresentados os resultados eletroquímicos das amostras que foram tratadas termicamente em três temperaturas de austenitização, temperadas e revenidas em duas temperaturas (200°C e 400°C).

Segundo Pinedo (2000), quanto maior a temperatura de revenimento, maior a concentração de precipitação de carbonetos, ou em outras palavras, menor resistência a corrosão. Sendo assim, a temperatura de revenimento é um grande influenciador na resistência a corrosão do material.

Os gráficos do material revenido à 200°C e 400°C estão demonstrados nas Figuras 45 e 46, bem como seus respectivos dados obtidos nas Tabelas 17 e 18.

Figura 45 - Curva de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas, temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de a) 980°C, b) 1015°C e c) 1050°C – ambas revenidas à 200°C



Fonte: (A autora, 2023).

Tabela 17 - Dados obtidos do Gráfico de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas, temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de 980°C, 1015°C e 1050°C e revenidas à 200°C

	980°C			1015°C			1050°C		
	30 min	60 min	120 min	30 min	60 min	120 min	30 min	60 min	120 min
I_{corr} (nA/cm ²)	0,0000008	0,0000002	0,0000011	0,0255270	0,0034818	0,0001950	0,0000007	0,0000003	0,0016722
I_{Pass} (nA/cm ²)	-	-	-	0,9332543	0,0189322	0,0170828	0,0000049	0,0000028	0,5759702
E_{pite} (V)	-	-	-	0,3629	0,8385	0,3979	0,1632	-0,0458	0,2178
E_{corr} (V)	-0,1982	0,0165	0,2552	-0,4380	-0,3667	-0,3641	-0,7011	-0,4508	-0,5863
E_{pass} (V)	-	-	-	-0,1834	-0,2324	0,8933	-0,5840	-0,3792	-0,3962
E_{prot} (V)	0,3519	0,3651	0,1120	-0,4431	-0,2101	-0,4488	-0,4985	-0,4787	-0,5591
$\Delta E_{pite} = E_{pite} - E_{corr} $	-	-	-	0,8009	1,2052	0,7620	0,8643	0,4050	0,8041
Região de Histerese (V)*	-	-	-	0,8060	1,0486	0,8467	0,6617	0,4329	0,7769
Grau de proteção (V)*	0,5501	0,3486	0,1432	0,0051	0,1566	0,0847	0,2026	0,0279	0,0272

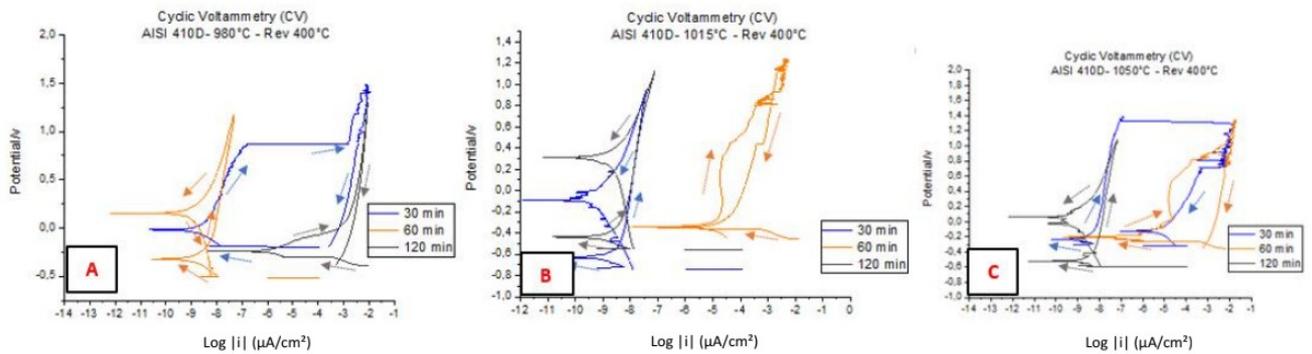
* ΔE_{pite} (V) = $|E_{pite} - E_{corr}|$

*Região de Histerese (V) = $|E_{pite} - E_{prot}|$

*Grau de proteção (V) = $|E_{corr} - E_{prot}|$

Fonte: (A autora, 2023)

Figura 46 - Curva de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas, temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de a) 980°C, b) 1015°C e c) 1050°C - ambas revenidas à 400°C



Fonte: (A autora, 2023).

Tabela 18 - Dados obtidos do Gráfico de Polarização Cíclica aço 410D austenitizadas, temperadas nos tempos de 30, 60 e 120 min nas temperaturas de 980°C, 1015°C e 1050°C e revenidas à 400°C

	980°C			1015°C			1050°C		
	30 min	60 min	120 min	30 min	60 min	120 min	30 min	60 min	120 min
I_{corr} (nA/cm ²)	0,0000011	0,0000012	0,0008720	0,0000005	0,0009629	0,0000005	0,0000005	0,0000312	0,0000010
I_{Pass} (nA/cm ²)	0,0000051	0,0000043	-	-	0,0157906	0,0000037	0,0000054	-	0,0000052
E_{pite} (V)	0,8631	-	-	-	0,4339	-	1,3400	-0,0526	-0,4584
E_{corr} (V)	-0,0209	-0,3181	-0,2411	-0,6321	-0,3484	-0,4319	-0,2334	-0,2110	-0,5187
E_{pass} (V)	0,1270	-0,1679	-	-	-0,2636	-0,3456	-0,1087	-	-0,4015
E_{prot} (V)	-	0,1542	-	-0,0903	-0,3399	0,3151	-0,1231	-	0,0619
$\Delta E_{pite} = E_{pite} - E_{corr} $	0,8840	-	-	-	0,7823	-	1,5734	0,1584	0,0603
Região de Histerese (V)*	-	-	-	-	0,7738	-	1,4631	-	0,5203
Grau de proteção (V)*	-	0,4723	-	0,5418	0,0085	0,7470	0,1103	-	0,5806

* ΔE_{pite} (V) = $|E_{pite} - E_{corr}|$

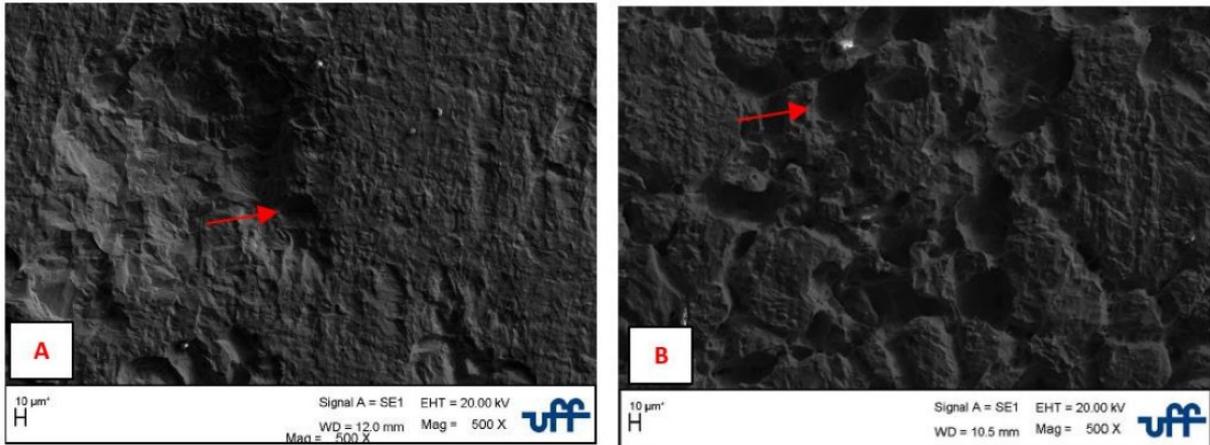
*Região de Histerese (V) = $|E_{pite} - E_{prot}|$

*Grau de proteção (V) = $|E_{corr} - E_{prot}|$

Fonte: (A autora, 2023)

Através dos gráficos 45 e 46 observa-se que com o aumento do revenimento de 200°C para 400°C a resistência a corrosão tende a piorar. O revenimento em temperaturas mais altas pode levar à precipitação de carbonetos de cromo, que são fases ricas em carbono e cromo. Esses carbonetos podem diminuir a quantidade de cromo disponível na matriz do aço, reduzindo sua capacidade de formar uma camada passiva de óxido de cromo protetora. Conseqüentemente, a corrosão por pites, que é um tipo localizado de corrosão, pode ser favorecida nesses locais onde ocorreu a precipitação de carbonetos. Fato esse é observado pela fotomicrografia da Figura 47. As setas indicam um dos vários pites formados.

Figura 47 - Fotomicrografia (MEV) da amostra austenitizada, temperada e revenida à 200°C em 1.00 Kx, a) à 1050°C em 60 min, b) à 1015°C em 60 min

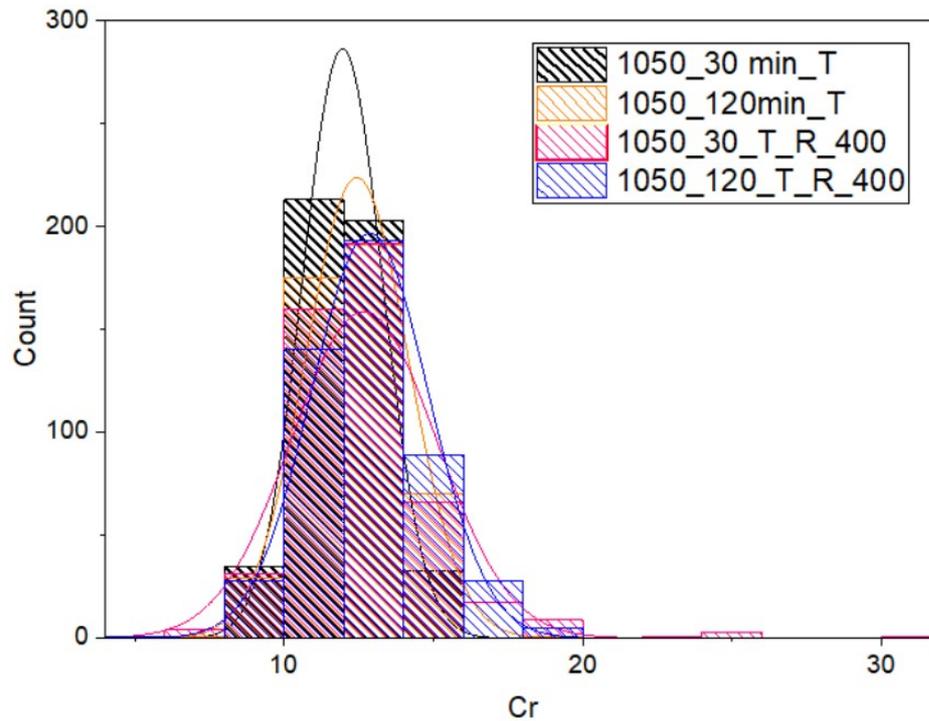


Fonte: (A autora, 2023)

Através da Figura 46, observa-se que o aço revenido à 400°C é o que menos passiva quando comparado com o revenido à 200°C (Figura 45), ocorrendo a corrosão diretamente, demonstrando que talvez não seja o método mais efetivo para tratamento desse aço quanto a resistência a corrosão. Segundo Peissl et al (2006), em temperaturas de revenido igual ou acima a 400°C é comum a redução da resistência a corrosão devido a uma possível precipitação acentuada de carbonetos finos, que ricos em cromo, reduzem a resistência a corrosão. Além disso, o coalescimento desses carbonetos pode ocorrer em temperaturas de revenido mais altas, o que pode afetar ainda mais a resistência à corrosão do aço martensítico 410D. O coalescimento dos carbonetos cria regiões de menor teor de cromo, aumentando a suscetibilidade à corrosão localizada, como a corrosão por pites.

Após os resultados de dureza e de resistência à corrosão, decidiu-se comparar a distribuição de Cr de 4 amostras, sendo elas: amostra austenitizada e temperada a 1050°C por 30 min, 1050°C por 120 min e as amostras 1050°C por 30 min revenida à 400°C e 1050°C por 120 min revenida à 400°C, conforme Figura 48.

Figura 48 - Distribuição de Cr nas amostras

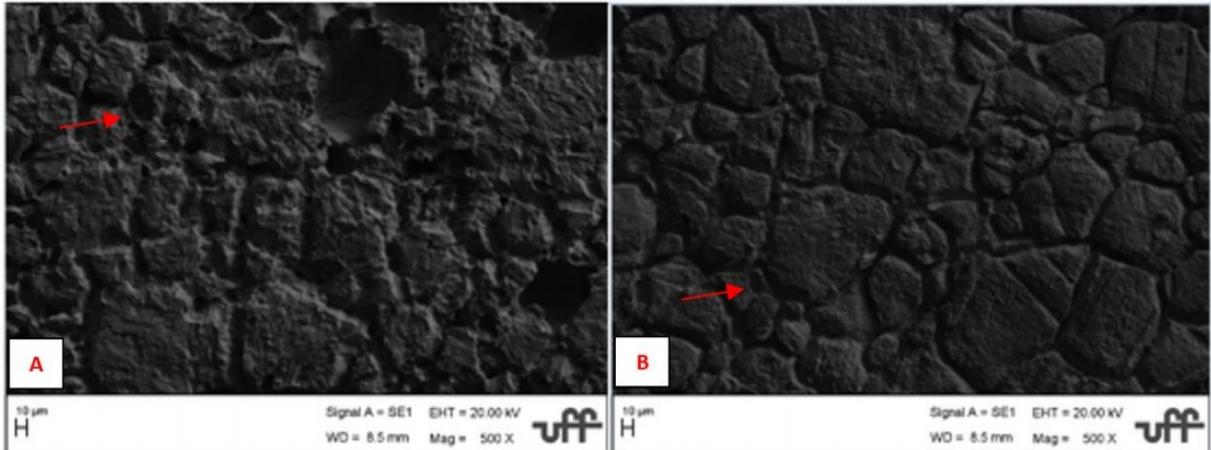


Fonte: (A autora, 2023)

A Figura 48 demonstra através da análise EDS a distribuição de Cr na amostra austenitizada e temperada a 1050°C em 30 min (curva preta), a amostra austenitizada e temperada a 1050°C em 120 min (curva laranja), amostra austenitizada, temperada a 1050°C em 30 min e revenida à 400°C (curva rosa), amostra austenitizada, temperada a 1050°C em 120 min e revenida à 400°C (curva azul). Observa-se na Figura 48 que as curvas de distribuição em rosa e azul tem maior dispersão, apresentando que essas amostras apresentaram uma maior variação de Cr, ou seja, áreas com depleção de Cr, e isso se dá provavelmente aos carbonetos irem para os contornos, gerando a depleção da matriz para o carboneto e no caso os carbonetos estão com mais Cr, gerando corrosão nos contornos. A curva laranja começa a ter uma distribuição mais uniforme, mas é na curva em preto que a distribuição se torna mais homogênea, em torno de uma média 11% de Cr. Essa análise confirma o fato de que a amostra austenitizada e temperada a 1050°C em 30 min é a que possui a melhor resistência a corrosão.

A Figura 49 demonstra as amostras que passaram por austenitização, têmpera e revenido na temperatura de 1050°C, 30 e 120 min a 400°C respectivamente em fotomicrografias. A figura 49 juntamente com as figuras 43 e 44 reafirmam os dados obtidos pela análise EDS (figura 48). As setas na figura 49 indicam que a corrosão ocorre entre os contornos.

Figura 49 - Fotomicrografia (MEV) da amostra austenitizada, temperada e revenida à 400°C em 500 x a) 30 min
b) 120 min



Fonte: (A autora, 2023).

Em praticamente todas as amostras pode-se observar a presença de pites, alguns pequenos pites com maior profundidade, outros de profundidade razoável, outros até mesmo difíceis de se visualizar. A tabela 19 demonstra visualmente os efeitos mencionados, bem como os ensaios de corrosão das demais amostras. As amostras faltantes nessa tabela 19, não passaram pelo MEV, devido à grande corrosão sofrida na amostra, impossibilitando a análise no MEV.

Tabela 19 - Fotomicrografia (MEV) das amostras pós ensaios de corrosão

Continua

Treatamento	Temperatura	Tempo de Encharque	Detalhamento	Fotomicrografias MEV
CR	-	-	Pites aparentes	

Tabela 19 - Fotomicrografia (MEV) das amostras pós ensaios de corrosão

Continuação

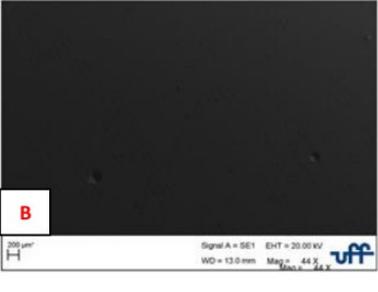
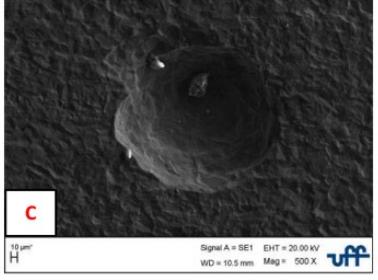
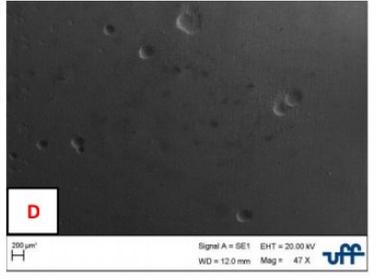
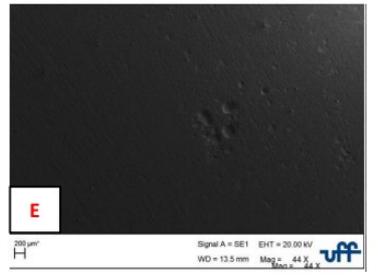
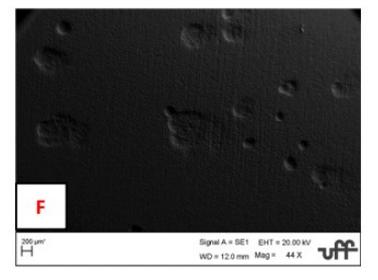
Austenitizadas e Temperadas	980°C	60 min	Pequenos pites em pequena área	
		120 min	Pites em pequena área	
	1015°C	30 min	Pites em uma área considerável média	
		60 min	Pites em pequena área	
		120 min	Pites em uma área considerável média	

Tabela 19 - Fotomicrografia (MEV) das amostras pós ensaios de corrosão

Continuação

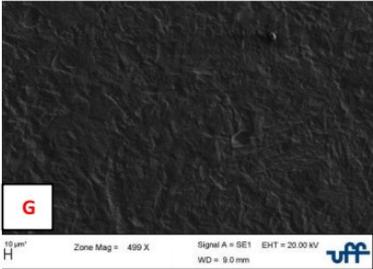
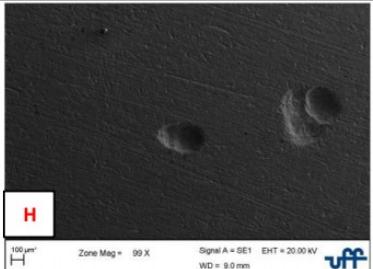
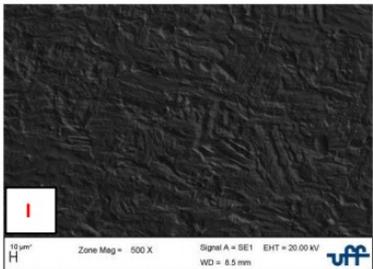
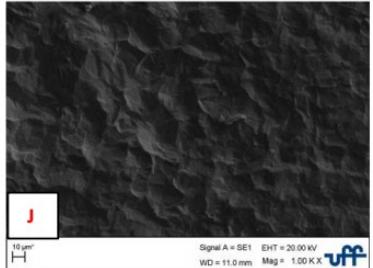
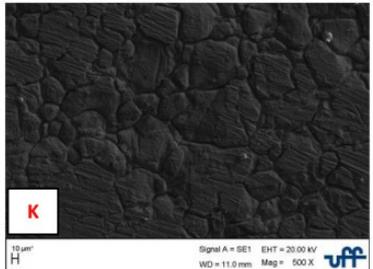
	1050°C	30 min	Ausência de pites	
		60 min	Pites circulares aparentes em pequenas áreas com maior profundidade	
		120 min	Ausência de pites	
Austentizadas, Temperadas e Revenidas à 200°C	1015°C	30 min	Pequenos pites	
		120 min	Aspecto craquelado com corrosão entre os contornos	

Tabela 19 - Fotomicrografia (MEV) das amostras pós ensaios de corrosão

Continuação

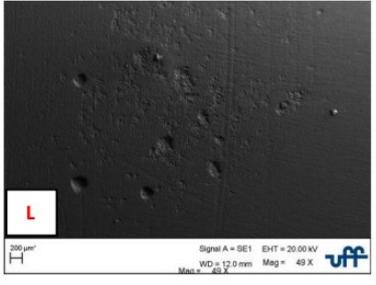
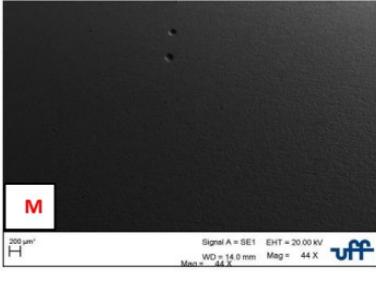
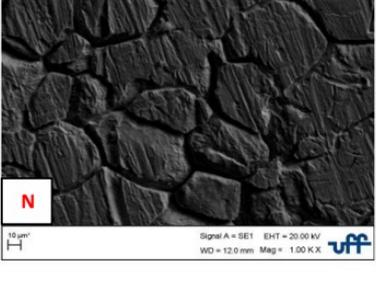
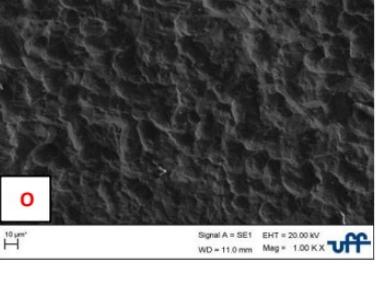
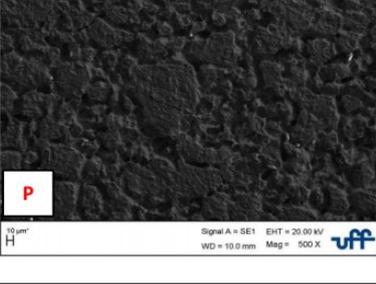
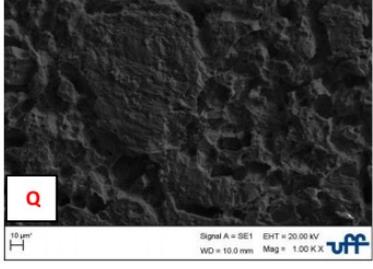
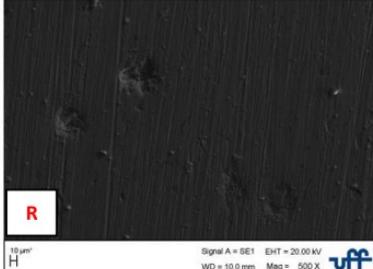
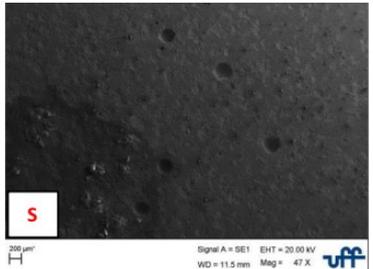
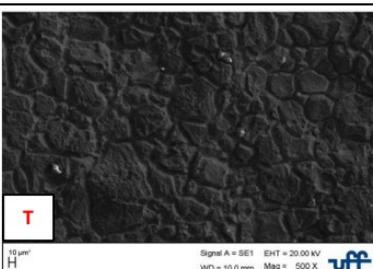
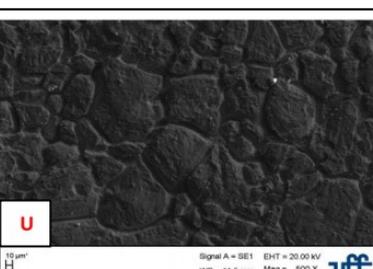
	1050°C	30 min	Pites circulares em área considerável média	
		60 min	Pites profundos em uma pequena área	
		120 min	Aspecto craquelado com corrosão entre os contornos	
Austentizadas, Temperadas e Revenidas à 400°C	980°C	30 min	Pites em área considerável	
		60 min	Aspecto craquelado com corrosão entre os contornos	

Tabela 19 - Fotomicrografia (MEV) das amostras pós ensaios de corrosão

Conclusão

		120 min	Aspecto craquelado com corrosão entre os contornos	
1015°C		60 min	Pites circulares em uma área considerável média	
1050°C		30 min	Pites circulares aparentes em área considerável média	
		60 min	Aspecto craquelado com corrosão entre os contornos	
		120 min	Aspecto craquelado com corrosão entre os contornos	

Fonte: (A autora, 2023)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram analisadas as mudanças microestruturais, mecânicas e eletroquímicas do aço inoxidável martensítico 410D. Realizaram-se tratamentos térmicos de austenitização, têmpera e revenido e as principais conclusões obtidas foram:

A amostra como recebida possui uma microestrutura composta de carbonetos esferoidizados dispersos por toda matriz ferrítica, conferindo-a a presença de pites e consequentemente uma baixa resistência a corrosão, com uma baixa dureza (o que é esperado de um aço sem tratamento).

Os tratamentos de austenitização e têmpera juntamente com suas temperaturas de 980°C, 1015°C e 1050°C nos tempos de 30 min, 60 min e 120 min, foram capazes de alterar significativamente a microestrutura do aço 410D. Isso resultou no aumento da dureza quando comparada com a amostra em seu estado inicial, que pode ser decorrência da dissolução de carbonetos de cromo que são responsáveis por elevar tanto o teor de cromo, quanto o de carbono dissolvidos na matriz, aumentando dessa forma, o grau de supersaturação da martensita pelo carbono. O ápice da dureza foi de 404 HV (41 HRC) na amostra austenitizada e temperada à 1050°C no tempo de 30 min.

Após a realização da austenitização e têmpera, foi realizado o revenimento e observa-se que há uma pequena diminuição nos valores de dureza quando comparados as amostras submetidas aos tratamentos de austenitização e têmpera. Isso pode-se explicar pela precipitação de carbonetos na matriz, sendo que esses carbonetos são compostos ricos em cromo que se formam nas microestruturas do aço. Eles ajudam a endurecer o aço, mas também contribuem para a diminuição da dureza, pois não são tão rígidos quanto a estrutura martensítica original. Outro fator que contribui para que a dureza diminua é a redução de tensões internas, pois após o processo de têmpera, há a criação de uma estrutura martensítica inicialmente dura, podendo gerar tensões internas no material. Com isso, o revenimento ajuda a relaxar essas tensões, acarretando certa diminuição na dureza.

A avaliação de propensão à corrosão no aço se mostra efetiva em praticamente todos os tratamentos realizados. Através das fotomicrografias, é possível verificar a presença de pites ou corrosão intergranular em praticamente todas as amostras. Outro fator observado e que afirma a teoria de alguns estudos é que a temperatura de revenimento é um fator que influencia no processo de degradação do material por corrosão.

Com o objetivo de encontrar a condição que melhor correlaciona maior valor de dureza e uma boa resistência à corrosão, verifica-se que a amostra austenitizada e temperada à 1050°C

em 30 min se mostrou através da sua curva e fotomicrografias, melhor resistência a corrosão e também pelo maior valor de dureza encontrado (404 HV ~ 41 HRC). Isso se reafirmou com a análise EDS em que a distribuição de Cr está mais homogênea se mantendo a uma média de 11% de Cr.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Análise da influência da espessura da camada passiva no processo corrosivo;
- Realizar ensaios de impedância eletroquímica nas amostras;
- Avaliar a resistência ao desgaste dos materiais estudados neste trabalho;
- Determinação do efeito do tratamento térmico frente a fragilização por hidrogênio;
- Determinação de temperatura crítica de pites;

8 REFERÊNCIAS

A PINEDO, C.E. Estudo Morfológico e Cinético da Nitretação por Plasma Pulsado do aço Inoxidável Martensítico AISI 420. Ph.D. Thesis, Energetic and Nuclear Research Institute — São Paulo University, São Paulo, SP, Brazil, 2000.

ALBERTI, E. L. “Desenvolvimento de Técnicas de Diagnóstico da Corrosão em Pés de Torres de Linhas de Transmissão, Por Meio de Aplicação de Técnicas Eletroquímicas”. Curitiba – PR. 2004, p.95. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Programa de PósGraduação em Engenharia

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM A240, Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate , Sheet , and Strip for Pressure Vessels and for General Applications, ASTM International, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G46-94: Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. ASTM International, 2013.

ANDERKO. A.; SRIDHAR, A.; DUNN, D.S.. A general model for the repassivation potential as a function of multiple aqueous solution species. Corros. Sci., 46 (2004), pp. 1583-1612.

ANDERSSON, J-O, HELANDER, T., HÖGLUND, L. et al., “Thermo-Calc & DICTRA, computational tools for materials science”, Calphad, v. 26, N. 2, pp. 273-312, 2002.

APERAM STAINLESS EUROPE. MA5: martensitic stainless steel with a high degree of hardness and improved resistance to corrosion for knife blades and cutting tools. 2016.

ARAÚJO, C. R. Estudo do comportamento anódico do aço inoxidável ABNT 304 com filme de interferência, em NaCl 3,5% e FeCl₃.6H₂O 6% p/v. 1999.

ASM International, 2003. ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys 10th ed., ASM International. Available at: <http://books.google.com.br/books?id=qA87AQAIAAJ>.

AZEVEDO, Alessandra Gois Luciano de. Soldagem A-TIG em Aço Inoxidável Ferrítico. 2012. 178 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

Barlow, L. D., Du Toit, M. (2012) Effect of austenitizing heat treatment on the microstructure and hardness of martensitic stainless steel AISI 420. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, p.1327-1336.

BERTHOMÉ, G.; MALKI, B.; BAROUX, B.. Pitting transients analysis of stainless steels. at the open circuit potential. *Corrosion Science* 48 (2006) 2432–2441.

BHADESHIA, H.K.D.H; HONEYCOMBE, R.W.K. *Steels: Microstructure and properties*. Editora: Butterworth-Heinemann. 4 ed. 2017.

BIRBILIS, N.; ZHANG, R.; LIM, M.L.C.; GUPTA, R.K.; DAVIES, C.H.J.; LYNCH, S.P.; KELLY, R.G.; SCULLY, J.R.. Quantification of sensitization in AA5083-H131 via imaging Ga-embrittled fracture surfaces. *Corrosion* (2012).

BONIARDI, Marco; CASAROLI, Andrea. *Stainless Steels*. 1ª ed. Brescia: Lucefin. 2014. 235p.

BRANDON D.; KAPLAN W. D. *Microstructural Characterization of Materials*. 2. ed. Wiltshire: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.

C.A.D. Rodrigues, P.L.D. Lorenzo, A. Sokolowski, C.A. Barbosa, J.M.D.A. Rollo. Titanium and molybdenum content in supermartensitic stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 460–461 (2007) 149-152.

C.J SCHEUER E ALL. Effects of Heat Treatment Conditions on Microstructure and mechanical Properties of AISI 420 Steel. 21° CBECIMAT— Cuiabá, MT, SP, Brazil, 2014.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciências e engenharia de materiais: uma introdução*. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. p. 336-340, 590-595.

CANDELÁRIA, A.F., PINEDO, C.E. Influence of the heat treatment on the corrosion resistance of the martensitic stainless steel type AISI 420. *Journal of Materials Science Letters*, v. 22, p. 1151 – 1153, 2004.

CARDOSO, Jorge Luiz. Avaliação e comparação da resistência a corrosão por pites do aço super austenítico AL 6XN PLUS e dos aços inoxidáveis austeníticos da série AISI304L, 316L e 317L, 2011. 94 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2011.

"CAREY, J. W. et al. Analysis and performance of oil well cement with 30 years of CO₂ exposure from the SACROC Unit, West Texas, USA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 1, n. 1, p. 75- 85, Apr. 2007."

Carrouge, D. Transformation in Super Martensitic Stainless Steels. University of Cambridge, 2002. 195 p. (Thesis - Department of Materials Science and Metallurgy).

CARVALHO, M.A.N., Módulo Geral; Catálogo de Produtos Inox da Acesita, Seminário Inox 2020, Roças Novas-MG, 2020.

CASTRO, G.M., Estudo da Oxidação a Quente no Aço Inoxidável Ferrítico ABNT 430, 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

CESAR DI CUNTO, JULIO; Estudo da resistência à corrosão de aços inoxidáveis para uso na parte fria dos sistemas de exaustão de veículos, 2005. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Julio%20Cesar%20di%20Cunto_M.pdf>
Acesso em 05/02/22

Chakraborty, G., Das CR, Albert SK, Bhaduri AK, Paulo VT, Paneerselvam G, Dasgupta A. Study on tempering behaviour of AISI 410 stainless steel. *Materials Characterization*. 2015, 100: 81–87.

CHARLES, J.. Past, present and future of the duplex stainless steels. Duplex Conference, Grado, Italy, 18-20 June, 2007.

CHAUHAN, A. K., GOEL, D. B., PRAKASH, S. Solid particle erosion behavior of 13Cr-4Ni and 21Cr-4Ni steels. *Journal of Alloys and Compounds*. (2008), doi:10.1016/j.jallcom.2007.12.053.

CHEN; A.Y.; HU; W.F.; WANG, D.; ZHU, Y.K.; WANG, P.; YANG, J.H.; WANG, X.Y.; GU, J.F.; LU, J.. Improving the intergranular corrosion resistance of austenitic stainless steel by high density twinned structure. *Scripta Materialia*, Volume 130, 15 March 2017, Pages 264–268.

Chenna Krishna S, Narendra Kumar Gangwar, Abhay K. Jha, Bhanu Pant, Koshy M. George. Microstructure and properties of 15Cr-5Ni-1Mo-1W Martensitic stainless steel. *Steel Research International* 86 1 (2015) 51-57

Chiaverini, *Aços e Ferros Fundidos*, 7 ed. ABM, São Paulo, V. (2008).

COLPAERT H. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. 4.ed. São Paulo: Blucher,2008.

CORRÊA, E.C.S; ROSA, J.B.D; MAGALHÃES, A.S; LOPES, W. BRAGA, C; LOURENÇO,P.P.C. Influência dos parâmetros de têmpera e revenimento sobre a dureza e a microestrutura do aço AISI M2. In: *ABM Anual Congress, 72nd, 2017, São Paulo*, p. 1697-1704.

COX, W. M. A strategic approach to corrosion monitoring and corrosion management. *Procedia Engineering*, v. 86, p. 567–575, 2014

DALMAU, A.; RICHARD, C.; MUÑOZ, A. Igual –. Degradation mechanisms in martensitic stainless steels: Wear, corrosion and tribocorrosion appraisal. *Tribology International*, v. 121, p.167-179, maio 2018. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X18300367>>. Acesso em 21 de maio de 2022.

De-ning Zou, Xiao-hua Liu, Ying Han, Wei Zhang, Jiao Li, Kun Wu. Influence of heat treatment temperature on microstructure and property of 00Cr13Ni5Mo2 Supermartensitic stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research International* 21(3) (2014) 364-368.

Dick Zilnyk, Karhl; Avaliação da estabilidade microestrutural do aço ODS-EUROFER, 2015. Disponível em: <<https://teses.usp.br>> Acesso em 02/03/22

DUARTE, B. J.; Efeito da temperatura de aquecimento na têmpera sobre a microestrutura e a dureza do aço aisi m2 após revenimento em temperaturas diversas. Disponível em: <https://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCCII-_2%C2%BA_-2015_Junia-Bicalo-Duarte-vers%C3%A3o-final.pdf> Acesso em: 27/01/22

FILHO, D. F.; FERRARESI, V. A. Soldabilidade do aço inoxidável ferrítico. 16° POSMEC. FEMEC/UFU, Minas Gerais – Uberlândia, 2006.

GARRISON, W. M. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Elsevier Science Ltd. 2001, pp. 8804 – 8810

GARZÓN, C. M.; TSCHIPTSCHIN, A. P. (2005). Nitretação Gasosa em alta Temperatura de Aços Inoxidáveis. Revista Matéria, 1–23.

Gemelli, E. Corrosão de Materiais Metálicos e Sua Caracterização. Rio de Janeiro, RJ, LTC, 2001.

GENTIL, V.; Corrosão, 6ª ed., LTC Livros Técnicos e Científicos S.A.: Rio de Janeiro, 2011. George Totten. Steel Heat Treatment Handbook. CRC Press, Taylor and Francis Group, Portland, 2007. 833 p.

Gonçalves dos Santos Jr, A., Volcanoglo Biehl, L., & Marasca Antonini. Efeito do tratamento de passivação química na resistência à corrosão por pite dos aços inoxidáveis ferrítico AISI 430 e austenítico AISI 316L, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0293>> Acesso em: 08/10/2021

GONZALEZ FERNANDEZ, J. A. Control de la corrosión: Estudio y medido por tecnicas electroquimicas. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Cientificas, Centro Nacional de Investigaciones Metalurgicas – Grafipen S. A. 1989. 487p.

GRACIOSO, J.F.F. Efeito das Condições de Têmpera na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Martensítico Fundido ca6nm UFSC 2003, Florianópolis,SC.

Haldar, S. Suwas, and D. Bhattacharjee (eds.); *Microstructure and Texture in Steels*, Springer 2009.

ICZ. Como a galvanização reduz custos e aumenta a durabilidade das estruturas de painéis fotovoltaicos. ICZ – Instituto de Metais Não Ferrosos. 2020

Isfahany, A.N., Saghafian, H., Borhani, G. (2011) The Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Corrosion Behavior of AISI420 Martensitic Stainless Steel. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, p.3931-3936.

ISSF. 2007. “A solução Ferrítica – Guia essencial para o aço inoxidável ferrítico”. International Stainless Steel Forum (ISSF), disponível em <http://www.nucleinox.org.br>; acessado em 21/05/2022.

ISSF. 2021. “Fórum Internacional de Aços Inoxidáveis”. International Stainless Steel Forum (ISSF), disponível em <https://www.abinox.org.br/site/agenda-inox-noticias>; acessado em 17/06/2022

J. E. Truman, *British Corrosion Journal* 11 (1976) 92 – 96

JIANG, W. H.; JIANG, F.; GREEN, B. A.; LIU, F. X.; LIAW, P. K.; CHOO, H.; QIU, K. Q. Electrochemical corrosion behavior of a Zr-based bulk-metallic glass. *Applied Physics*
José Antonio Nunes de Carvalho; *Aços Inox. Características e Propriedades de Uso.Seminário Inox 2000. ACESITA*

KELLY, R.G. Pitting. In: *Corrosion Test and Standards: Application and Interpretation*, R. Baboian. (ed.) ASTM Manual Seris, Philadelphia, MNL 2005.

KIM, H.J.; JEON, S.H.; KIM, S.T.; LEE, I.S.; PARK, Y.S.; KIM, K.T.; KIM, Y.S. Investigation of the sensitization and intergranular corrosion of tube-to-tubesheet welds of

hyper duplex stainless steel using an electrochemical reactivation method. *Corrosion Science*, Volume 87, October 2014, Pages 60–70.

KIMURA K., YAMAOKA, S. Influence of high pressure normalizing heat treatment on microstructure and creep strength of high Cr steels, *Materials Science & Engineering A*, v.387-389, p628-632, dez 2004.

KRAUSS, G. Martensite in steel: strength and structure, *Materials Science and Engineering*, Elsevier, 12-1999. Volumes 273–275, Pages 40-57

Kulikovsky, A.A. Fuel cell basics. In *Analytical Modeling of Fuel Cells*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 1–33

KUMAR S.; KUMAR A.; VINAYA; MADHUSUDHAN R.; RAMESHWAR S.; MANJINI S. Mechanical and Electrochemical Behavior of Dual-Phase Steels Having Varying FerriteMartensite Volume Fractions *J. of Materials Engineering and Performance*, 2019

L. L. Shreir, R. A. Jarman, G. T. Burstein, *Corrosion*, Vol. 1, Ed. Butterworth & Heinemann, Vol. 1, (2000) 1:36 – 1:54.

LIPPOLD, J. C., KOTECKI, D. J. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. New Jersey, USA: JohnWiley & Sons, 2005. (Publication Hoboken).

MAGNABOSCO, Rodrigo. *Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF 2205)*, 2001.

MARCOMINI, J.B. *Fragilização da martensita revenida no aço SAE 5160H*. Dissertação de Mestrado. 2008

MARIANO, N. A; MUROLO, J. P. Efeito do Tratamento Térmico na Microestrutura e Resistência à Corrosão da Liga 12Cr1,8Ni0,1C. *Revista Matéria*, v. 11, n. 2, pp. 138 – 145. Universidade São Francisco (USF). Itatiba – SP, 2006;

MARTINS, M.; BONAVIDA, L. F. Efeito da temperatura na microestrutura do aço ASTM A890 GR 6A. 58º Congresso anual da ABM. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2003.

MARTINS, M.; FORTI, L. R. N. Effect of aging on impact properties of ASTM A890 Grade 1C super duplex stainless steel. *Materials Characterization*, v. 59, p. 162–166, 2008.

Matlakhov, N. A. (2008) Apostila: Prevenção da corrosão. LAMAV/CCT, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, Campos dos Goytacazes - RJ. Capítulo 8: 125-127p.

MENEZES, J. W. A.; REIS, F. E. U.; ABREU, H. F. G; MIRANDA, H. C.; RIBEIRO, J. E. MEI P.R. Aços e ligas especiais. 3.ed. São Paulo: Blucher; 2011

MODENESI, P. J. Soldabilidade de aços inoxidáveis. Vol. 1. São Paulo: SENAI SP, 2001.

MORAES, F. C. Influência da microestrutura dos aços inoxidáveis (Austeníticos, Ferríticos e Martensíticos) na proteção contra a corrosão por filmes de Polianilina. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo (USP), Instituto de Química de São Carlos. São Carlos – SP, 2006;

Moreira, Claudio. Relação-estrutura-propriedades-processamento de aços inoxidáveis martensíticos, 2021. Disponível em: < <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/38360>> Acesso em: 12/01/2022

NESIC, S. Key issues related to modeling of internal corrosion of oil and gas pipelines: a review. *Corrosion Science*, v. 49, n. 12, p. 4308-4338,. 2007.

Nunes, L.P. (2007) Fundamentos de Resistência à Corrosão. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 330p

Park JY, Park YS. The effects of heat treatments parameters on corrosion resistance and phase transformations of 14Cr-3Mo martensitic stainless steel. *Materials Science and Engineering*. 2007; 449-451: 1131-1134.

PEISSL, S.; MORI, G.; LEITNER, H.; EBNER, R.; EGLSAER, S. Influence of chromium, molybdenum and cobalt on the corrosion behaviour of high carbon steels in dependence of heat treatment. *Materials and Corrosion* 2006, 57, No. 10.

Ponte, Haroldo. Eletroquímica aplicada e corrosão TQ-417, 2003. Disponível em: <<http://www.gea.ufpr.br/arquivos/lea/material/Fundamentos%20da%20Corrosao.pdf>> Acesso em: 22/01/22

PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.; SHERIF, M. Y. Phase transformations in metals and alloys. 3th ed. London: CRC Press, 2009. 616 p.

PRYDS, N.H., HVANG, X., “The Effect of Cooling Rate on The Microstructures Formed During Solification of Ferritic Steel”, Metallurgical and Materials Transactions A, v. 31A, pp.3155-3166, 2000.

R. Heidersbach. Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production. Wiley Series in Corrosion, 2011. 296 p

RAJASEKHAR, A. Influence of austenitizing temperature on microstructure and mechanical properties of AISI 431 martensitic stainless steel electron beam welds. Materials and Design. 2008. 13p.

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, v. 8, n. 4, p.529-546, ago. 2015. FapUNIFESP (SciELO);

Ribeiro, R., Hein, L., & Codaro, E. (2005). ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DOS PITES NOS MATERIAIS RESISTENTES À CORROSÃO. IX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e V Encontro Latino Americano de Pós-Graduação (pp. 1306-1309). Universidade do Vale do Paraíba.

Rodrigues A.D, Cesar; Qualidade do aço inoxidável martensítico do tipo AISI-420 utilizado na confecção de ferramentas cirúrgicas. 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rem/a/Vy7Pbd7XF4tymtbn3QTTvWz/?lang=pt&format=pdf>> Acesso em: 15/10/21

SANTOS, W.C. et. Al. Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v.20, n.2, p.304-315, Abr./ June. 2015

SILVA, F.M.J, Melhoria da lingotabilidade do aço inoxidável ferrítico AISI 409 na Arcelor Mittal Inox Brasil. Dissertação de Mestrado. 2009

Silva, Mariana; Influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido na tenacidade ao impacto e sensibilização do aço supermartensítico 13% Cr; 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/9813/1/tese_9843_Mariana.pdf> Acesso em: 12/03/2022

Silva, V. F, Marcos.; Pereira, C, Marinalda., Codaro N, Eduardo. Corrosão do aço-carbono: Uma abordagem do cotidiano no ensino da química. 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/cVwbpdPmGzTFRGCBFsc368M/?lang=pt&format=pdf>> Acesso em: 09/11/21.

Siqueira O., Marcelo; Previsão de falha de um aço inoxidável martensítico utilizando teoria das distâncias críticas associada ao conceito de material equivalente, 2019. Disponível em: <<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais>> Acesso em: 02/03/22

Siqueira, Jordânio.; Influência de tratamentos térmicos na resistência a corrosão localizada do aço inoxidável martensítico ABNT 440C aplicado em rolamentos, 2018. Disponível em: <http://www.dissertacao_2019005.pdf> Acesso em: 23/10/21

TAIT, W. Stephen. An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists. Racine: Pair O'Docs Publications, Wisconsin, USA. 1994. 155p.

TAVARES, S.S.M. Engenharia dos Materiais I. 2015. Universidade Federal Fluminense, Niterói. 461p. Slides das apresentações em aula.

Tripadalli, Claudia; Estudo comparativo de metodologias de ensaios acelerados de corrosão por frestas nas ligas de aço inox AISI 430 e AISI 304, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br>> Acesso em 02/10/21.

VASCONCELOS, P. M. A. Soldagem autógena do aço inoxidável ferrítico AISI 410S. Monografia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2011.

WOLYNEC, S. Técnicas Eletroquímicas em Corrosão – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003 – (Acadêmica: 49)