



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

ALEX JUNIO SANTOS SILVA

**EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE PERMANÊNCIA
SOBRE A EVOLUÇÃO DA CAMADA DE ÓXIDOS APLICADO AO
AÇO AISI 430 LAMINADO A QUENTE**

TIMÓTEO/MG

2025

ALEX JUNIO SANTOS SILVA

**EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE PERMANÊNCIA
SOBRE A EVOLUÇÃO DA CAMADA DE ÓXIDOS APLICADO AO
AÇO AISI 430 LAMINADO A QUENTE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Me. Matheus Mello Pereira.

Coorientadora: Dra. Karina A. M. B. Gonçalves.

TIMÓTEO/MG

2025

FOLHA DE APROVAÇÃO

ALEX JUNIO SANTOS SILVA

EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE PERMANÊNCIA SOBRE A EVOLUÇÃO DA CAMADA DE ÓXIDOS APLICADO AO AÇO AISI 430 LAMINADO A QUENTE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Timóteo, 21 de fevereiro de 2025.



Documento assinado digitalmente

MATHEUS MELLO PEREIRA

Data: 21/02/2025 17:01:05-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Presidente e Orientador: Me. Matheus Mello Pereira

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Campus Timóteo



Documento assinado digitalmente

KARINA APARECIDA MARTINS BARCELOS GONC.

Data: 21/02/2025 19:05:33-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Titular e Coorientadora: Dr.^a Karina Aparecida Martins Barcelos Gonçalves Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Campus Timóteo



Documento assinado digitalmente

RODRIGO FERREIRA GOMES

Data: 21/02/2025 17:14:54-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Titular: Me. Rodrigo Ferreira Gomes Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP



Documento assinado digitalmente

ERRISTON CAMPOS AMARAL

Data: 21/02/2025 17:45:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Titular: Dr. Erriston Campos Amaral
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Campus Timóteo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus em forma de adoração e louvor por tudo que realizou em minha vida. À minha esposa, Maria Isabel Barbosa Bessa, e ao meu filho, Ravi Samuel Barbosa Santos, por serem meu alicerce, me dando amor e motivação todos os dias. Aos meus orientadores, amigos e colegas da faculdade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda força, sabedoria e entendimento, tudo que tenho e conquistei e pela graça e glória dele. Este trabalho não seria possível sem o apoio incondicional de pessoas especiais, e é com imensa gratidão que expresso meu agradecimento a todos.

À minha esposa, Maria Isabel Barbosa Bessa, e ao meu filho, Ravi Samuel Barbosa Santos, pelo amor, paciência e compreensão, que me deram a motivação necessária para continuar nos momentos mais difíceis. À minha mãe, Rosália, e ao meu pai, Francisco, por sempre acreditarem em mim e me incentivarem a buscar meus sonhos.

Aos meus irmãos, André e Alexandre, pelo apoio constante e por estarem ao meu lado em todas as fases dessa jornada.

Ao meu orientador, Matheus Mello Pereira, e à minha coorientadora, Karina A. M. B. Gonçalves, pela orientação precisa, paciência e dedicação. Suas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à empresa Aperam South América, por todo o apoio e fornecimento das amostras, além da realização dos ensaios via MEV-EDS, fundamentais para a pesquisa.

Ao pesquisador Cláudio Moreira de Alcântara, pelo compartilhamento generoso de seu conhecimento, pela paciência e pelas conversas enriquecedoras, que sempre me direcionaram nos momentos de dúvida.

A todos os meus colegas de faculdade, por compartilharem essa experiência e por toda a troca de ideias. Um agradecimento especial à Keydiane e à Celine, que foram fundamentais no início e no andamento deste trabalho, sempre dispostas a colaborar e ajudar com ideias e sugestões.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso, deixo minha eterna gratidão. Este trabalho é resultado de um esforço coletivo, e sou imensamente grato por cada apoio recebido.

RESUMO

Os aços inoxidáveis constituem uma categoria especial de ligas metálicas, caracterizando-se por teores de cromo entre 11% e 27% em peso, conferindo-lhes propriedades diferenciadas, como elevada resistência à corrosão. Dentre esses materiais, os aços inoxidáveis ferríticos destacam-se por sua excelente maleabilidade, tenacidade e resistência mecânica, sendo amplamente utilizados em aplicações industriais. O AISI 430, em particular, apresenta grande versatilidade, tornando-se uma escolha frequente na indústria. No entanto, seu processo produtivo requer um tratamento térmico de recozimento, realizado em temperaturas elevadas por um período predefinido. Devido ao alto teor de cromo presente no AISI 430, a camada de óxidos formada após o tratamento térmico é predominantemente composta por cromo, conferindo elevada aderência e ductilidade à superfície. Isso pode dificultar processos subsequentes, como a decapagem, tornando essencial o estudo detalhado da formação e evolução dessa camada. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo investigar a influência da temperatura e do tempo de permanência no crescimento da camada de óxidos formada durante o recozimento de um aço AISI 430 laminado a quente. O procedimento experimental incluiu a preparação das amostras, submetidas a cortes padronizados com dimensões aproximadas de 10 mm × 10 mm. Em seguida, foi realizado o tratamento térmico de recozimento a 650°C, 745°C e 840°C, seguido de resfriamento ao ar até a temperatura ambiente. As amostras foram, então, submetidas a procedimentos metalográficos, incluindo embutimento, desbaste, lixamento, polimento e ataque químico. Para a caracterização microestrutural e análise da camada de óxidos, foram utilizadas as técnicas de Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada ao sistema de Espectroscopia por Energia Dispersiva (MEV-EDS). Os resultados obtidos indicaram que o tratamento térmico do aço inoxidável AISI 430 a 650°C e 745°C impactou sua microestrutura e propriedades mecânicas. A 650°C, houve aumento na fração de ferrita e redução de martensita, com queda na dureza até 12,5 horas de encharque. A 840°C, a dureza reduziu significativamente após 20 horas, possivelmente devido ao coalescimento de carbonetos. O crescimento da camada de óxido foi influenciado pelo tempo de encharque, especialmente a 745°C e 840°C. A exposição prolongada a 840°C favoreceu a precipitação de carbonetos nos contornos de grão, aumentando a susceptibilidade à corrosão. O estudo destaca a importância do controle térmico para otimizar propriedades do AISI 430.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis ferríticos; AISI 430; Tratamento térmico de recozimento; Camada de óxidos.

ABSTRACT

Stainless steels are a special category of metallic alloys characterized by chromium contents ranging from 11% to 27% by weight, providing them with distinct properties such as high corrosion resistance. Among these materials, ferritic stainless steels stand out for their excellent malleability, toughness, and mechanical strength, making them widely used in industrial applications. In particular, AISI 430 exhibits great versatility, making it a frequent choice in the industry. However, its production process requires an annealing heat treatment, carried out at high temperatures for a predefined period. Due to the high chromium content present in AISI 430, the oxide layer formed after heat treatment is predominantly composed of chromium, which gives the surface high adhesion and ductility. This can hinder subsequent processes such as pickling, making it essential to conduct a detailed study of the formation and evolution of this layer. In this context, the present study aims to investigate the influence of temperature and soaking time on the growth of the oxide layer formed during the annealing of hot-rolled AISI 430 steel. The experimental procedure included sample preparation, where specimens were cut to standardized dimensions of approximately 10 mm × 10 mm. Subsequently, the annealing heat treatment was performed at 650°C, 745°C, and 840°C, followed by air cooling to room temperature. The samples then underwent metallographic preparation, including mounting, grinding, polishing, and chemical etching. For microstructural characterization and oxide layer analysis, Optical Microscopy (OM) and Scanning Electron Microscopy coupled with Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS) were employed. The results indicated that the heat treatment of AISI 430 stainless steel at 650°C and 745°C significantly impacted its microstructure and mechanical properties. At 650°C, an increase in the ferrite fraction and a reduction in martensite were observed, along with a decrease in hardness up to 12.5 hours of soaking time. At 840°C, hardness was significantly reduced after 20 hours, possibly due to carbide coalescence. The oxide layer growth was influenced by soaking time, particularly at 745°C and 840°C. Prolonged exposure at 840°C favored carbide precipitation at grain boundaries, increasing susceptibility to corrosion. This study highlights the importance of precise thermal control to optimize the properties of AISI 430 stainless steel.

Keywords: Ferritic stainless steels; AISI 430; Annealing heat treatment; Oxide layer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Classificação dos aços inoxidáveis ferríticos com base na composição química e elementos de liga.....	14
Figura 3.1 - Teor de cromo (% em massa) em função da taxa de corrosão.....	16
Figura 3.2 - Formação de uma camada protetora de óxido de cromo , na presença de oxigênio, em um aço inoxidável.....	17
Figura 3.3 - Diagrama de fases de um sistema de liga Fe-Cr.....	19
Figura 3.4 - Fluxo de produção do aço AISI 430 em uma indústria siderúrgica.....	21
Figura 3.5 - Influência dos elementos intersticiais (C e N) no deslocamento do campo da austenita no diagrama Fe-Cr.....	22
Figura 3.6 - Micrografia do aço AISI 430 após laminação a quente a 1.100°C.....	24
Figura 3.7 - Microestrutura da Zona Fundida (ZF) de uma solda no AISI 430. Ampliação de 100×.....	24
Figura 3.8 - Faixa de normalização de acordo com o teor de carbono em porcentagem massa.....	28
Figura 3.9 - Esquema típico utilizado no recozimento em caixa.....	30
Figura 3.10 - Curva dos tratamentos utilizados no estudo de precipitação de carbonetos.....	35
Figura 3.11 - Esquema representativo das camadas de óxidos formadas durante a oxidação de aços inoxidáveis em altas temperaturas. A imagem destaca diferentes zonas de oxidação e transformação do material. As setas indicam o fluxo de oxigênio (O ₂) para dentro do material e a saída de monóxido de carbono (CO), processos típicos em condições oxidantes.....	36
Figura 3.12 - Preferência na oxidação em função na energia livre de Gibbs apresentado pelo diagrama de <i>Ellingham</i>	37
Figura 4.1 - Esquema da retirada de amostra laminada a quente.....	41
Figura 4.2 - Curvas do ciclo de recozimento. Salienta-se que as linhas pontilhadas indicam os tempos de encharque adotados.....	43
Figura 4.3 - Amostras recozidas após a retirada do forno.....	43
Figura 5.1 - Micrografia da amostra AISI 430 sem tratamento térmico, obtida por microscopia óptica a 25°C. Ampliação 100×.....	47

Figura 5.2-	Micrografias das amostras AISI 430 submetidas ao tratamento térmico de recozimento isotérmico a 650°C, com diferentes tempos de encharque, obtidas por microscopia óptica a 25°C: (A) 1 hora, (B) 5 horas, (C) 12h30 e (D) 20 horas, com ampliação de 100×.....	49
Figura 5.3 -	Micrografias das amostras AISI 430 submetidas ao tratamento térmico de recozimento isotérmico a 745°C, com diferentes tempos de encharque, obtidas por microscopia óptica a 25°C: (A) 1 hora, (B) 5 horas, (C) 12h30 e (D) 20 horas, com ampliação de 100×.....	50
Figura 5.4 -	Micrografias das amostras AISI 430 submetidas ao tratamento térmico de recozimento isotérmico a 840°C, com diferentes tempos de encharque, obtidas por microscopia óptica a 25°C: (A) 1 hora, (B) 5 horas, (C) 12h30 e (D) 20 horas, com ampliação de 100×.....	52
Figura 5.5 -	Micrografia da amostra AISI 430 submetida a 20 horas de encharque, obtida por microscopia óptica a 25°C, com ampliação de 400×.....	53
Figura 5.6 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 650°C por 1 hora de encharque.....	56
Figura 5.7 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 650°C por 5 horas de encharque....	56
Figura 5.8 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 650°C por 12h30 de encharque.....	56
Figura 5.9 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 650°C por 20 horas de encharque..	57
Figura 5.10 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 745°C por 1 hora de encharque.....	58
Figura 5.11 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 745°C por 5 horas de encharque....	59
Figura 5.12 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 745°C por 12h30 de encharque.....	59
Figura 5.13 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 745°C por 20 horas de encharque..	60
Figura 5.14 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 840°C por 1 hora de encharque.....	61
Figura 5.15 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 840°C por 5 horas de encharque....	61
Figura 5.16 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 840°C por 12h30 de encharque.....	62
Figura 5.17 -	Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 840°C por 20 horas de encharque..	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição química dos aços ferríticos e suas aplicações.....	20
Tabela 3.2 - Composição química típica do aço AISI 430 em % em peso.....	23
Tabela 3.3 -Parâmetros de recozimentos utilizados em estudos com diferentes tipos de aços.....	32
Tabela 4.1 -Composição química (% em peso) das amostras de aço AISI 430 laminado a quente.....	41
Tabela 5.1 -Valores de dureza Vickers das amostras AISI 430 recozidas a 650°C e da amostra sem tratamento (ST). Cada valor apresentado é resultado de uma média obtida a partir de sete (07) medições realizadas para cada condição.....	49
Tabela 5.2 -Valores de dureza Vickers das amostras AISI 430 recozidas a 745°C. Cada valor apresentado é resultado de uma média obtida a partir de sete (07) medições realizadas para cada condição.....	51
Tabela 5.3 -Valores de dureza Vickers das amostras AISI 430 recozidas a 840°C. Cada valor apresentado é resultado de uma média obtida a partir de sete (07) medições realizadas para cada condição.....	53
Tabela 5.4 -Tamanho médio da camada de óxido (μm) de acordo com o tempo e temperatura de recozimento.....	54

LISTA DE SIGLAS

AIF	Aço Inoxidável Ferrítico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCC	Cúbica de Face Centrada
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva – <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
FEA	Forno Elétrico a Arco
FFBAC	Ferro Fundido Branco Alto Cromo
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> – Soldagem a Arco com Gás Tungstênio
HV	<i>Hadnees Vickers</i> – Dureza Vickers
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado
LTQ	Laminação de Tiras a Quente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MEV-EDS	Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada ao sistema de Espectroscopia por Energia Dispersa
MO	Microscopia Óptica
SE	Elétrons Secundários – <i>Secondary Electron</i>
TL	Tesouras Longitudinais
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1	AÇO INOXIDÁVEL	16
3.1.1	Aço Inoxidável Ferrítico (AIF).....	19
3.1.2	AISI 430	21
3.2	TRATAMENTO TÉRMICO	26
3.2.1	Têmpera.....	26
3.2.2	Revenimento	27
3.2.3	Solubilização	27
3.2.4	Normalização	28
3.2.5	Recozimento.....	29
3.3	CAMADA DE ÓXIDOS.....	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	MATERIAIS.....	41
4.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	41
4.2.1	Tratamento térmico de recozimento	42
4.3	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DA TEMPERATURA E DO TEMPO NA FORMAÇÃO DA CAMADA DE ÓXIDO.....	44
4.3.1	Caracterização microestrutural por Microscopia Óptica (MO)	45
4.3.2	Caracterização microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura por Energia Dispersiva (MEV-EDS)	45
4.4	ENSAIO DE DUREZA VICKERS	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	MATERIAL COMO RECEBIDO	47
5.2	EFEITO DOS TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS NA MICROESTRUTURA	48
5.2.1	Tratamento isotérmico a 650°C	48
5.2.2	Tratamento isotérmico a 745°C	50

5.2.3 Tratamento isotérmico a 840°C	52
5.3 EFEITO DOS TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS NA CAMADA DE ÓXIDO	54
5.3.1 Influência da temperatura e tempo de permanência na espessura da camada de óxido	54
5.3.2 EDS das amostras tratadas a 650°C	56
5.3.3 EDS das amostras tratadas a 745°C.	58
5.3.4 EDS das amostras tratadas a 840°C	60
6 CONCLUSÃO.	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável é um material que passou por avanços significativos ao longo das últimas décadas, sendo amplamente reconhecido por sua resistência à corrosão e durabilidade excepcionais. Ele pode ser classificado em diversas famílias, incluindo os austeníticos, ferríticos, martensíticos e duplex, este último contendo frações volumétricas balanceadas de austenita e ferrita. O contínuo progresso em pesquisa e desenvolvimento nesta área tem sido fundamental para a inovação tecnológica, resultando na criação de novas ligas e no aprimoramento das existentes, o que expande ainda mais as aplicações dos aços inoxidáveis. Esses avanços têm desempenhado um papel crucial na ampliação do leque de possibilidades para a utilização desses materiais em setores industriais diversos (CARBÓ, 2008).

O aço inoxidável ferrítico AISI 430 é amplamente reconhecido por suas diversas aplicações industriais, sendo o mais prevalente entre os aços de sua classe. No processo de sua fabricação, após a conclusão da laminação a quente, este aço é submetido a um recozimento em temperaturas superiores a 750°C. Este tratamento térmico é seguido pela manutenção do material em um forno durante um período específico, conhecido tecnicamente como tempo de permanência. Este procedimento é essencial para atingir a recristalização desejada e a homogeneização microestrutural. Subsequentemente, o aço é submetido a um resfriamento ao ar, técnica que é implementada para adquirir as propriedades específicas e desejáveis do material, incluindo uma relação otimizada entre sua estrutura interna e suas propriedades mecânicas. Estes processos são determinantes para as características finais do aço, assegurando sua adequação a uma ampla gama de aplicações práticas (CHIAVERINI, 2012; TAVARES *et al.*, 2017). Este processamento térmico é ainda mais relevante quando consideramos os fenômenos de oxidação que ocorrem em metais.

A Figura 1.1 apresenta a classificação dos aços inoxidáveis ferríticos, dividindo-os em cinco (05) grupos com base nos elementos de liga adicionados e em suas respectivas composições químicas. Essa categorização permite compreender as variações nas propriedades mecânicas e nas aplicações desses materiais, destacando a influência de elemento como cromo (Cr) na estabilidade da fase ferrítica, na resistência à corrosão e no desempenho em diferentes condições de serviço.

O processo de oxidação ocorre quando o metal entra em contato com o oxigênio, sendo intensificado em altas temperaturas, uma vez que a oxidação é facilitada pela difusão do oxigênio. Esse fenômeno cria um gradiente de concentração entre a superfície do metal e seu interior, promovendo a migração de átomos de oxigênio para a superfície (CASTRO *et al.*,

2006).

Figura 1.1 – Classificação dos aços inoxidáveis ferríticos com base na composição química e elementos de liga.

Grupo 1 (10~14)% Cr	Tipos 409, 410, 420
Grupo 2 (14~18)% Cr	Tipo 430
Grupo 3 (14~18)% Cr estabilizado	Tipos 430Ti, 439, 441, etc. Inclui elementos estabilizantes como o Ti, Nb, etc.
Grupo 4 Adição de Mo	Tipos 434, 436, 444, etc. Teor de Mo acima de 0,5%
Grupo 5 Outros	Teor de Cr (18~30)% ou não pertence a outros grupos

Fonte: Adaptado de Carbó (2008).

O aço AISI 430 contém uma quantidade significativa de cromo em sua composição, elemento que, devido à sua maior afinidade pelo oxigênio em comparação com o ferro (Fe), oxida preferencialmente. Além disso, o cromo tende a formar óxidos mais maleáveis e aderentes à superfície do metal. Esses fatores tornam a exposição prolongada a altas temperaturas um desafio, uma vez que favorece a formação de óxidos difíceis de remover durante os processos subsequentes de decapagem (CHIAVERINI 2012; OLIVEIRA, 2012; COURA *et al.*, 2021).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo analisar e estudar a influência das variáveis temperatura e tempo na evolução da camada de óxidos resultantes do tratamento térmico de recozimento no aço AISI 430 laminado a quente. Além disso, buscou compilar e sistematizar o conhecimento disponível na literatura, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de estratégias eficazes para minimizar os desafios relacionados à oxidação superficial.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar e estudar o impacto da temperatura e do tempo de permanência na evolução da camada de óxidos resultantes do tratamento térmico de recozimento em um aço de composição química típica do AISI 430 laminado a quente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos consistem em:

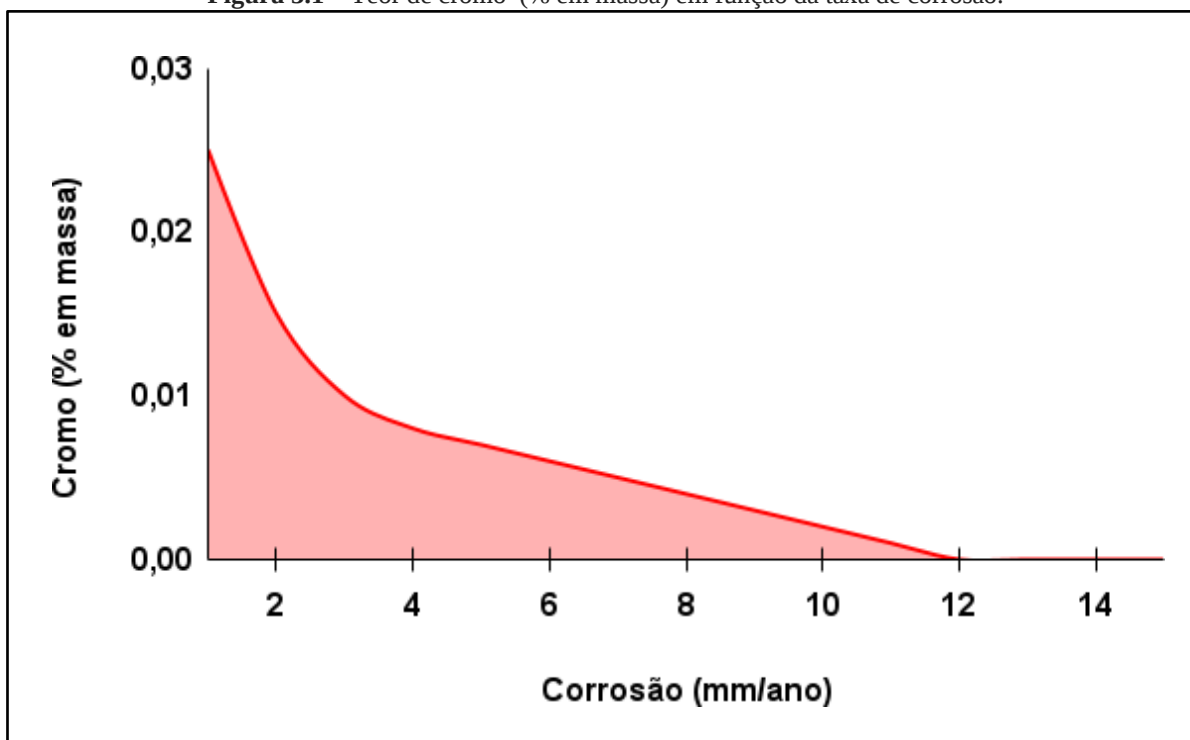
- i. Caracterizar as microestruturas das amostras antes e após o tratamento térmico de recozimento;
- ii. Realizar o tratamento térmico de recozimento nas amostras utilizando diferentes temperaturas (650°C, 745°C e 840°C) e tempos de permanência (60 min, 300 min, 745 min e 1.200 min); e
- iii. Analisar a morfologia e a composição química da camada de óxidos formada nos diferentes ensaios realizados no item (ii).

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 AÇO INOXIDÁVEL

Pinedo (2021) classifica os aços inoxidáveis como uma das famílias mais relevantes dentro dos aços de alta liga, destacando o cromo como seu principal elemento de liga. Esse elemento é responsável pela formação da camada passiva de óxido de cromo (Cr_2O_3), a qual confere ao material elevada resistência à corrosão em diversos ambientes. Para que essa camada protetora seja eficiente, é necessário que o teor de cromo no aço seja de, no mínimo, 11% em peso. A Figura 3.1 ilustra a relação entre o teor de cromo (% em massa) e a taxa de corrosão.

Figura 3.1 – Teor de cromo (% em massa) em função da taxa de corrosão.



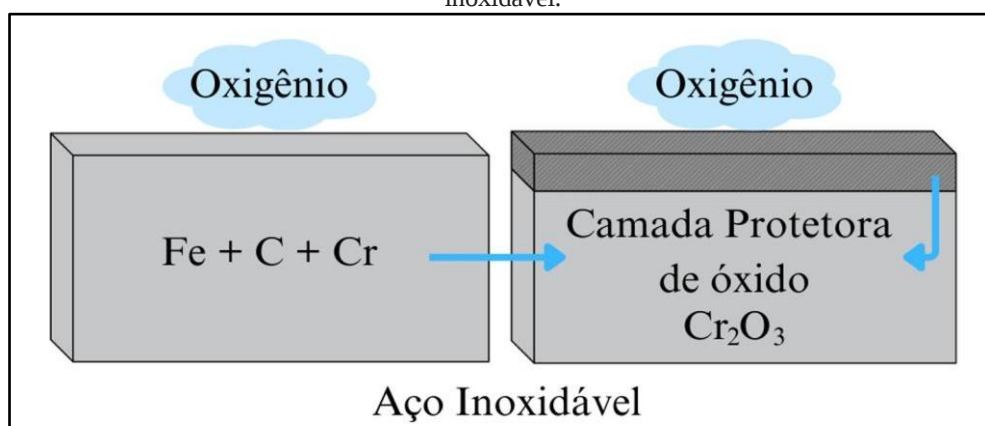
Fonte: Adaptado de Pinedo (2021).

O cromo (Cr) reage com o oxigênio presente no meio, formando uma camada passiva protetora, conforme ilustrado na Figura 3.2. Essa camada atua como uma barreira contra a corrosão em meios atmosféricos, impedindo a progressão da oxidação. Os filmes passivos ou camadas passivas são extraordinariamente finos, com espessura da ordem de 30 a 50 angströms ($\text{\AA}$), o que os torna praticamente imperceptíveis em observações macroscópicas. Além disso, a formação e manutenção desses filmes passivos nos aços inoxidáveis ocorrem em uma ampla variedade de ambientes, garantindo a alta resistência à oxidação característica dessa classe de

materiais (CARBÓ, 2008; CHIAVERINI, 2012).

A alta resistência à corrosão dos aços inoxidáveis está atrelada a camada de passivação formada por óxidos de ferro-cromo e de outros elementos de liga. A dissolução dessa camada em meio corrosivo (medida em peso de área, peso e unidade em função do tempo) é que ditará o quanto o material resiste à corrosão localizada e a corrosão uniforme (SILVA e MEI, 2021). Segundo Sedriks (1996), a corrosão em aços inoxidáveis é um fenômeno complexo influenciado por fatores metalúrgicos, ambientais e operacionais. A resistência à corrosão desses materiais é primariamente atribuída à formação de uma camada passiva de óxido de cromo (Cr_2O_3) na superfície, a qual protege o metal contra ataques corrosivos, conforme apresentado na Figura 3.2. No entanto, essa camada pode ser comprometida por condições adversas, resultando em diferentes tipos de corrosão (SEDRIKS, 1996).

Figura 3.2 – Formação de uma camada protetora de óxido de cromo, na presença de oxigênio, em um aço inoxidável.



Fonte: Adaptado de Coura (2021).

Os principais mecanismos de corrosão em aços inoxidáveis incluem a corrosão por *pites*, associada à presença de íons haleto (especialmente cloretos) e a corrosão intergranular, que ocorre devido à precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão durante tratamentos térmicos inadequados. Além disso, a corrosão sob tensão pode ocorrer em ambientes contendo cloretos, combinando efeitos mecânicos e químicos. O autor também discute a corrosão galvânica, que acontece quando o aço inoxidável entra em contato com metais de potencial eletroquímico distinto, favorecendo a formação de pares galvânicos (SEDRIKS, 1996). Sedriks (1996) enfatiza a importância da seleção adequada da liga, do controle dos processos de fabricação e do monitoramento das condições ambientais para garantir a durabilidade dos aços inoxidáveis. A compreensão desses mecanismos é essencial

para a otimização de aplicações industriais em setores como petroquímica, naval e biomédico, onde a resistência à corrosão é um requisito fundamental.

Os aços inoxidáveis são amplamente conhecidos por suas propriedades superiores, como resistência à corrosão e durabilidade, que são determinadas principalmente pela sua composição química e estrutura cristalina (CARBÓ, 2008). De acordo com Carbó (2008), essa classificação é feita com base na microestrutura e na organização cristalina do material, resultando em diferentes tipos de aços inoxidáveis. Esses tipos incluem: (i) aços inoxidáveis austeníticos, (ii) aços inoxidáveis ferríticos, (iii) aços inoxidáveis martensíticos e (iv) os aços inoxidáveis duplex, que apresentam uma combinação de ferrita e austenita em proporções aproximadamente iguais.

A compreensão dessas classificações é fundamental para compreender as diversas aplicações e características dos aços inoxidáveis. Os aços inoxidáveis austeníticos possuem cerca de 18% em peso de cromo e 8% em peso de níquel em sua composição. O níquel (Ni) é essencial para a resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas. Essas ligas se destacam pela excelente soldabilidade, boa ductilidade, não magnetismo e resistência mecânica, sendo utilizadas em uma ampla faixa de temperaturas, de ambiente até cerca de 1.150°C. A estrutura cristalina desses aços é Cúbica de Face Centrada (CFC) à temperatura ambiente. Suas principais aplicações incluem utensílios domésticos, peças para fornos, eixos, parafusos, porcas, peças para carburadores, eletrodos para solda e recipientes criogênicos. No entanto, devido à sua composição química, os aços austeníticos têm o maior custo entre os aços inoxidáveis (SEDRIKS, 1996; CARBÓ, 2008; CHIAVERINI, 2012; SILVA e MEI, 2021).

Por outro lado, os aços inoxidáveis martensíticos são formados pela transformação da austenita em martensita durante o resfriamento rápido. Com teor de carbono que pode chegar a 0,6% em peso, esses aços possuem maior resistência mecânica e à corrosão, com cromo variando entre 12% a 14% em peso. No entanto, sua resistência à corrosão é limitada em ambientes alcalinos e com cloretos, onde perdem a passivação (SEDRIKS, 1996; GONÇALVES, 2015).

Os aços inoxidáveis duplex foram desenvolvidos para combinar as melhores propriedades dos aços austeníticos e ferríticos, como maior resistência à corrosão, oxidação, tenacidade e ductilidade. Apresentam uma estrutura bifásica (austenítica e ferrítica), sendo mais resistentes do que os austeníticos e ferríticos puros. A composição dos aços duplex inclui cromo (22% a 28% em peso) e níquel (2% a 8% em peso), além de elementos como molibdênio (0,2% a 5% em peso), que melhora a resistência à corrosão por *pites* e nitrogênio (0,1% a 0,35% em peso), que aumenta a resistência mecânica e à corrosão localizada. Esses aços são amplamente

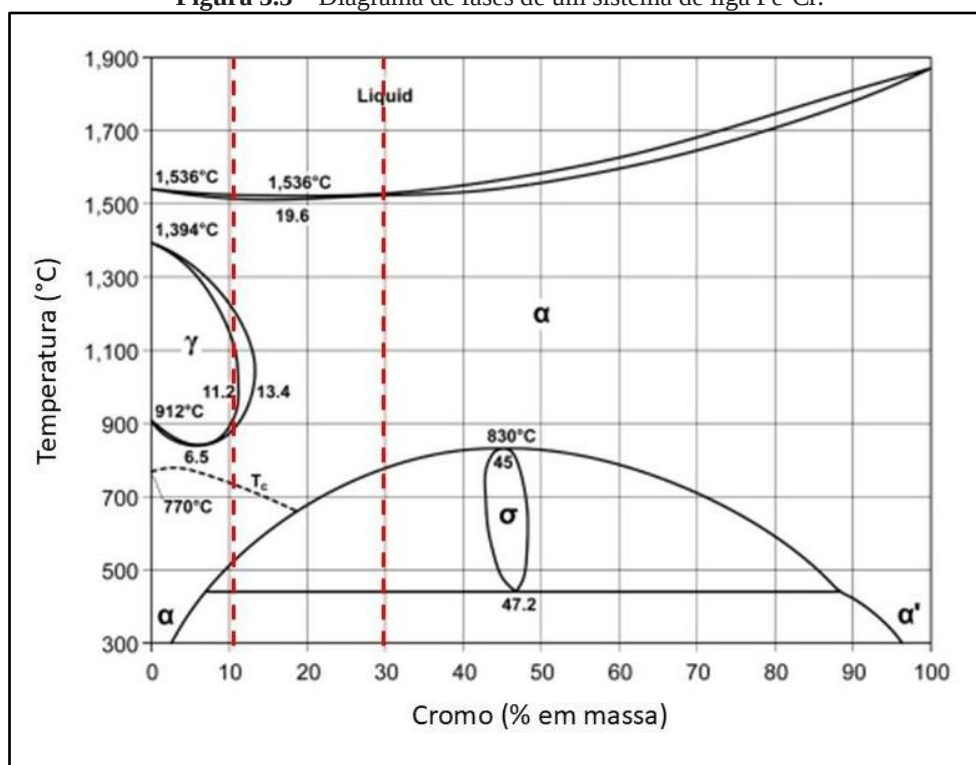
aplicados na indústria química, de polpa de papel, geração de energia e, principalmente, na extração de petróleo e gás (CHIAVERINI, 2012; SOUZA, 2012).

No tópico 3.1.1 serão abordados os aços inoxidáveis ferríticos, classe central desta monografia.

3.1.1 Aço Inoxidável Ferrítico (AIF)

Os Aços Inoxidáveis Ferríticos (AIF) se caracterizam por sua baixa resistência mecânica, se comparado aos demais aços inoxidáveis, principalmente em altas temperaturas. Essa característica está atrelada ao teor de cromo presente, que varia de 11,5% até 27% em peso, tornando a estrutura completamente ferrítica. A Figura 3.3 apresenta o diagrama Fe-Cr típico destes aços, destacando a faixa de teor de cromo presente (LACOMBE, BAROUX e BERANGER, 2000; SOUZA, 2012).

Figura 3.3 – Diagrama de fases de um sistema de liga Fe-Cr.



Fonte: Adaptado de Lacombe, Baroux e Beranger (2000).

O alto teor de cromo (Cr) confere a estes aços boa resistência à corrosão, boa maleabilidade e tenacidade. Além do cromo e do baixo teor de carbono, os aços ferríticos possuem outros elementos de ligas para se obter propriedades específicas. A Tabela 3.1 descreve os tipos mais comuns de aços ferríticos, bem como sua composição química,

aplicações e propriedades (CHIAVERINI, 2012; SILVA e MEI, 2021).

Tabela 3.1 – Composição química dos aços ferríticos e suas aplicações.

Aço	Composição química (% em massa)	Aplicações/propriedades
AISI 430	C < 0,12 Cr: 16 – 18	Aplicações: Fogões, talheres, baixelas, pias e revestimentos.
AISI 430 (Ti/Nb)	C < 0,12 Cr: 16 – 18 S < 0,15 Ti > 0,2 Nb > 0,3	Aplicações: Barras e produtos usináveis.
AISI 409	C < 0,03 Cr: 10,5 – 11,75 Ti > 0,6	Produtos para trabalho em temperaturas elevadas, a título de exemplo: sistemas de exaustão de automóveis.
AISI 434	C < 0,12 Cr: 16 – 18 Mo: 0,75 - 1,25	Resistência à corrosão sob tensão e corrosão por <i>pites</i> , aplicação em escapamentos de automóveis.
AISI 439	C < 0,07 Cr: 17 – 19 Ti > 0,2	Aplicação: Indústria automobilística e evaporadores.
AISI 444	C < 0,025 Cr: 17,5 – 19,5 Mo: 1,75 – 2,5 Ti > 0,2 Nb > 0,2	Resistência à corrosão por <i>pites</i> e corrosão sob tensão.
AISI 446	C < 0,06 Cr: 25 – 27	Resistente à corrosão e a oxidação em altas temperaturas, aplicação em componentes de fornos.

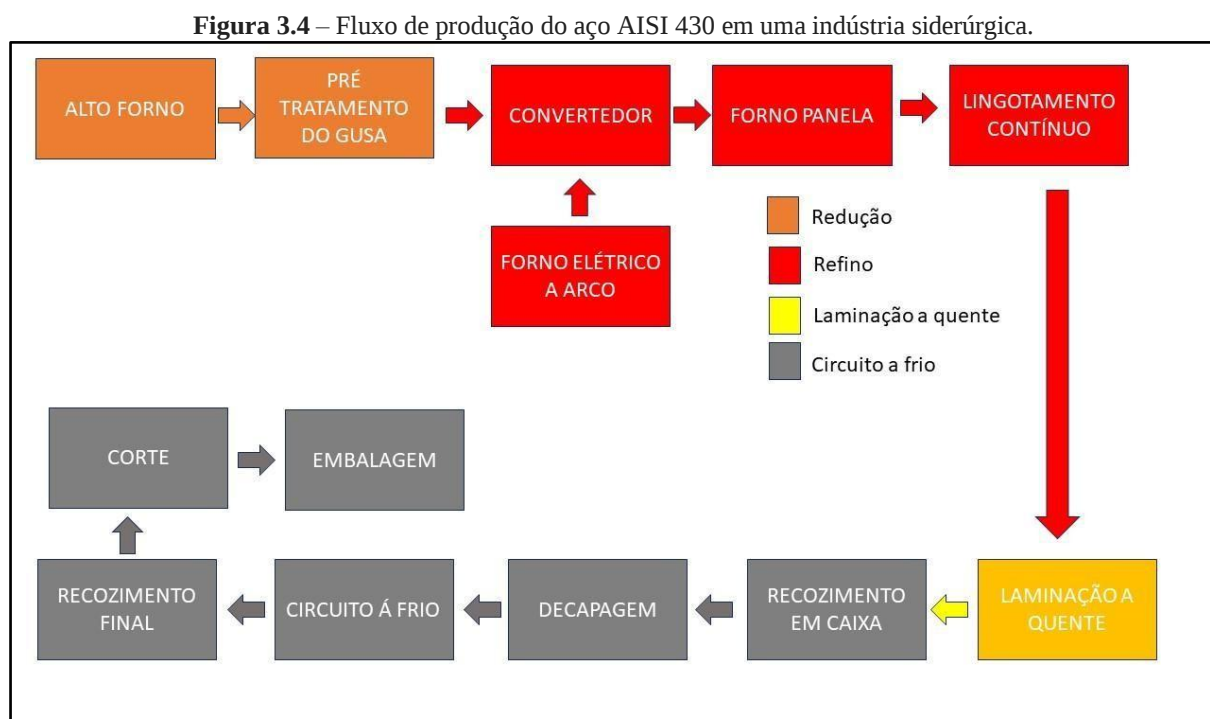
Fonte: Adaptado de Silva e Mei (2021).

Em temperatura ambiente, os aços inoxidáveis ferríticos apresentam uma estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado (CCC), assim como o ferro alfa (α). Esses aços contêm carbono (C) e nitrogênio (N) em sua composição, elementos que são estabilizadores da austenita. Para garantir que a estrutura desses aços permaneça completamente ferrítica, é necessário reduzir os teores de carbono e nitrogênio ou aumentar o teor de cromo (Cr), que tem um efeito estabilizador sobre a fase ferrítica (LACOMBE, BAROUX e BERANGER, 2000;

SOUZA, 2012; SILVA e MEI, 2021). Esse controle na composição é essencial para otimizar as propriedades dos aços ferríticos, como sua resistência à corrosão, tenacidade e capacidade de suportar temperaturas elevadas, sem comprometer sua microestrutura desejada.

3.1.2 AISI 430

Devido à sua notável resistência à corrosão, o aço AISI 430 destaca-se como a variante mais prevalente e popular entre os aços ferríticos, mesmo quando comparado a ligas mais recentes desenvolvidas. A produção em larga escala do AISI 430 é atribuída à sua ampla aplicabilidade na indústria, impulsionada pelas propriedades distintivas conferidas a este tipo de aço. Estas propriedades incluem notável resistência à corrosão, facilidade de conformação e menor tendência ao encruamento em comparação com os aços austeníticos (CHIAVERINI, 2012; TAVARES *et al.*, 2017). A Figura 3.4 apresenta de forma esquemática o fluxo de produção do aço AISI 430.



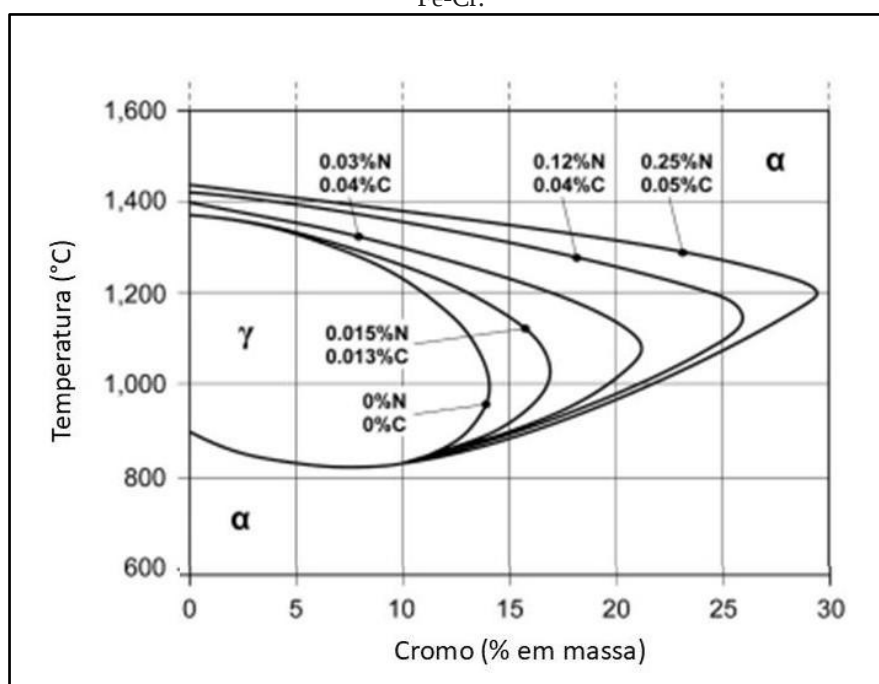
Fonte: Adaptado de Cordeiro (2023).

De acordo com Cordeiro (2023), o ferro gusa proveniente dos altos fornos ou o metal líquido proveniente do Forno Elétrico a Arco (FEA), é transformado em aço AISI 430 na aciaria. Após solidificação, o aço segue para a Laminação de Tiras a Quente (LTQ), onde é reduzido de uma espessura de 250 mm para espessuras que variam entre 3 mm e 8 mm. Ao final

do processo de laminação a quente, o material segue laminação a frio onde passa pelo recozimento em caixa e, em seguida, para a linha de decapagem mecânica e decapagem química para remoção dos óxidos formados na superfície. No laminador a frio, a espessura é novamente reduzida, dessa vez para 0,4 mm a 1,2 mm, aproximadamente. Posteriormente, é encaminhado para a linha de recozimento e decapagem final. Por fim, a liga metálica segue para as Tesouras Longitudinais (TL) onde será cortada e embalada de acordo com a solicitação do cliente.

A presença de elementos intersticiais, como carbono (C), nitrogênio (N) e manganês (Mn), favorece a formação da austenita, conforme ilustrado na Figura 3.5. Em geral, os aços inoxidáveis ferríticos com teor de cromo superior a 13% em peso podem sofrer uma transformação parcial da ferrita em austenita quando expostos a temperaturas acima de 900°C. Se, em seguida, forem resfriados rapidamente, resultam em uma estrutura bifásica, composta por ferrita e martensita (GONÇALVES, 2015).

Figura 3.5 – Influência dos elementos intersticiais (C e N) no deslocamento do campo da austenita no diagrama Fe-Cr.



Fonte: Adaptado de Lacombe, Baroux e Beranger (2000).

A fim de estabilizar o campo da ferrita, alguns elementos de liga são adicionados na composição química do aço AISI 430, tais como: titânio (Ti) e o nióbio (Nb), por serem mais eficientes que o cromo (Cr) na estabilização de nitretos e carbonetos os mesmos reagem preferencialmente com o carbono (C) e o nitrogênio (N) substituindo parcialmente ou completamente os carbonetos e nitretos de cromo (Cr) por Ti(C, N) e/ou Nb(C, N). Estes só se dissolvem completamente na ferrita em temperaturas em torno de 1.200°C. Limitando o teor de

carbono (C) e nitrogênio (N) na ferrita em temperaturas elevadas, o efeito austenizante causados por estes elementos é fortemente reduzido fazendo com que os aços estabilizados possuem uma microestrutura ferrítica desde a temperatura ambiente até a temperatura de fusão. Os elementos estabilizantes também reduzem a formação de precipitados de cromo e carbonetos, formados durante o processo de tratamento térmico (SOUZA *et al.*, 2013; LACOMBE, BAROUX e BERANGER, 2000). Para conhecimento e discussão, a Tabela 3.2 apresenta a composição química típica do aço AISI 430 comum e estabilizado em porcentagem em peso utilizado em alguns estudos recentes.

Tabela 3.2 – Composição química típica do aço AISI 430 em % em peso.

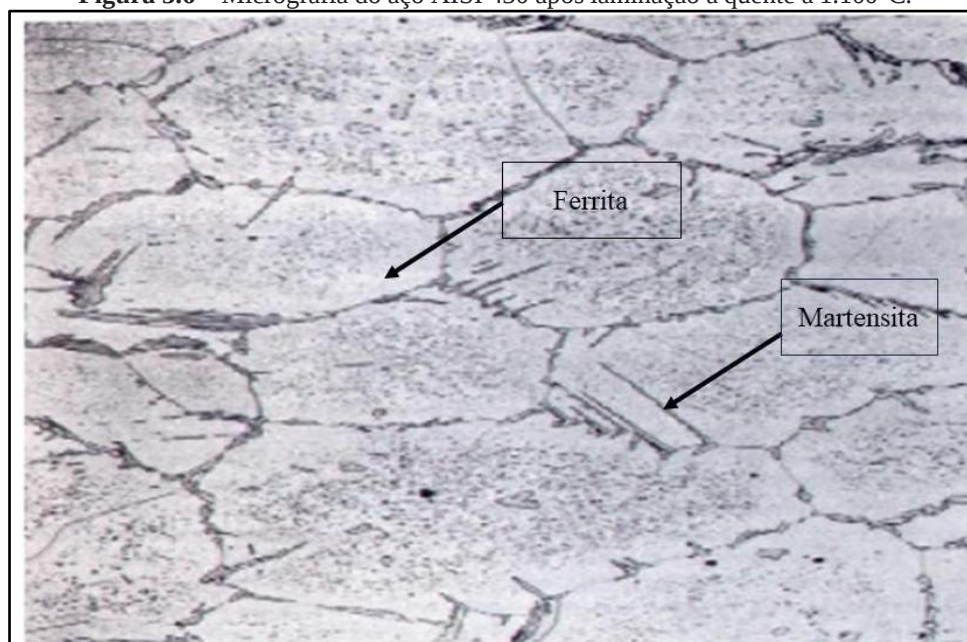
Aço	%C	%Cr	%Ti	%Nb	%P	%Ni	%Mn	%Si	N ₂ (ppm)	Referência
AISI 430	0,04	16,13	0	0	0,03	0,19	0,19	0,3	0	(CORDEIRO, 2023)
AISI 430	0,05	16,16	0,002	0,05	0,034	0,146	0,179	0,347	624	(GONÇALVES <i>et al.</i> , 2019)
AISI 430 Nb	0,021	16,37	0	0,412	0,026	0,141	0,15	0,373	239	
AISI 430 Ti	0,017	16,32	0,131	0,204	0,023	0,276	0,19	0,402	113	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O aço AISI 430 é equivalente ao aço ABNT 430 comum, pois ambos não contêm elementos estabilizantes em sua composição química. No entanto, após o processo de laminação a quente, o AISI 430 apresenta uma estrutura composta por martensita e ferrita. Para otimizar suas propriedades, é necessário realizar um tratamento térmico, visando à decomposição da martensita em carbonetos distribuídos pela matriz ferrítica (SCHMITT, 2013; SILVA e MEI, 2021). A Figura 3.6 ilustra uma microestrutura típica do aço AISI 430 após o processo de laminação a quente.

O teor de cromo nos aços estudados por Gonçalves *et al.* (2019) é comparável ao teor encontrado no aço analisado por Cordeiro (2023). No entanto, é importante destacar que os aços AISI 430 Nb e AISI 430 Ti, utilizados por Gonçalves *et al.* (2019) e listados na Tabela 3.2, contêm elementos estabilizantes. Como mencionado anteriormente, esses elementos têm um papel fundamental na estabilização da fase ferrítica, influenciando diretamente suas propriedades.

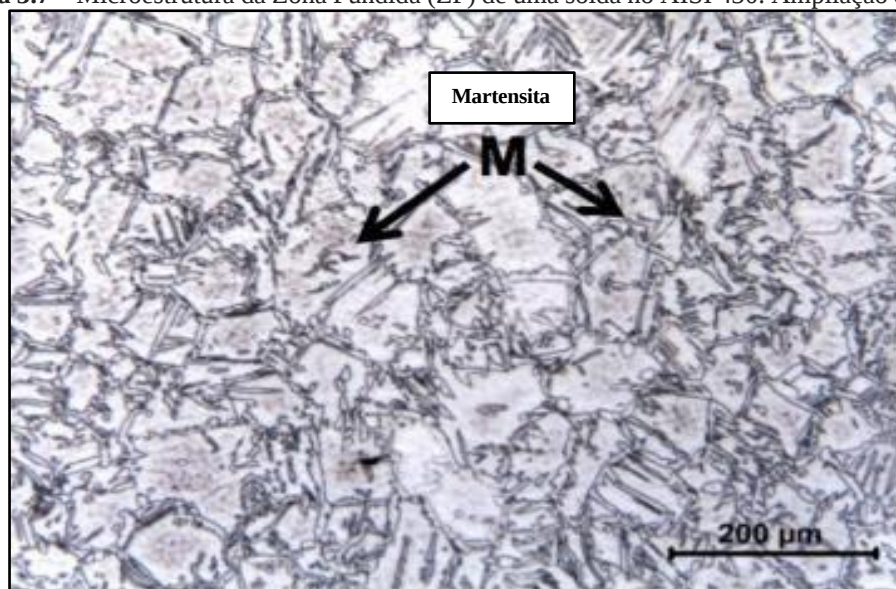
Figura 3.6 – Micrografia do aço AISI 430 após laminação a quente a 1.100°C.



Fonte: Adaptado de Lacombe, Baroux e Beranger (2000).

O teor residual de titânio (Ti) e nióbio (Nb) presente no aço AISI 430, investigado por Gonçalves *et al.* (2019), não exerceu influência significativa nos resultados finais do estudo, conforme evidenciado pela formação de martensita após o processo de soldagem, conforme relatado pelos autores e observado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Microestrutura da Zona Fundida (ZF) de uma solda no AISI 430. Ampliação de 100×.



Fonte: Adaptado de Gonçalves *et al.* (2019).

Cordeiro (2023) estudou a influência da temperatura de tratamento térmico na formação de carbonetos e na microestrutura do aço AISI 430. As amostras foram recozidas em

temperaturas variando de 750°C a 900°C sem período de permanência dentro do forno e resfriadas em água. Para essa variação de temperatura, não foi observado modificações significativas na microestrutura das amostras. As análises foram realizadas por meio dos ensaios de micrografia e microdureza. Entretanto, em amostras ensaiadas a temperaturas que variavam entre 950°C e 1.000°C foi constatado aumento significativo na dureza. Isso se deve à presença de martensita que é proveniente da transformação da ferrita em austenita a 1.000°C, que em alta taxa de resfriamento, 100°C s⁻¹, se transformou preferencialmente em martensita. O autor observou a partir da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) que em temperaturas acima de 950°C, há diminuição tanto na quantidade quanto no tamanho dos carbonetos precipitados, fato também observado nos estudos realizados por Gonçalves *et al.* (2019). Ainda, segundo o autor, tal fato ocorreu devido a região de estabilidade de carboneto de cromo ser até 875°C, logo para temperaturas acima deste valor não é mais previsto a formação ou a presença de carbonetos.

Gonçalves *et al.* (2019) avaliaram a influência do titânio (Ti) e do nióbio (Nb) na microestrutura no aço AISI 430 comum e nos estabilizados ao titânio e ao nióbio após a Soldagem a Arco com Gás Tungstênio (GTAW, do inglês *Gas Tungsten Arc Welding*). Todas as amostras foram laminadas e recozidas antes da realização do experimento. Salienta-se que devido às amostras serem fornecidas por uma empresa, não há parâmetros dos processos de laminação e recozimento antes realizados. A amostra do aço AISI 430 não estabilizado apresentou precipitados de cromo espalhados pela matriz ferrítica. Já nos aços estabilizados foram identificados precipitados de titânio e nióbio espalhados pela matriz, principalmente concentrados nos contornos de grão. Em relação ao tamanho de grão, os aços estabilizados apresentaram grãos de ferrita recristalizados com leve orientação no sentido de laminação, porém os grãos do aço AISI 430 comum foram menores em relação aos aços estabilizados. Após o processo de soldagem os autores identificaram uma rede de martensita nos contornos de grão tanto na Zona Termicamente Afetada (ZTA) quanto na Zona Fundida (ZF). Conforme explicado pelos autores e por Mallaiah *et al.* (2012), os teores de elementos intersticiais como o carbono (C) e o nitrogênio (N) contidos no aço, que favorecem a formação da austenita em temperaturas elevadas, virá a transformar-se em martensita durante o rápido resfriamento. Já os aços estabilizados apresentaram estruturas completamente ferrítica, o que segundo os autores e Ogburn e Davies (1997), é explicado devido ao titânio e nióbio serem melhores estabilizadores de carbonetos e nitretos do que o cromo. Além disso, reagem preferencialmente com o carbono e nitrogênio que ao terem seus teores reduzidos, o efeito austenitizante é reduzido, impedindo a formação da austenita em altas temperaturas, o que, após a soldagem, resulta em uma estrutura

completamente ferrítica em temperatura ambiente.

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Segundo Chiaverini (2012), o tratamento térmico consiste em um conjunto de operações, nos quais os aços são aquecidos controlando-se a temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento. Esses fatores influenciam diretamente no objetivo final do tratamento realizado. A título de exemplo, tem-se que a temperatura de aquecimento possui um fator importante tanto na dissolução das fases quanto no tamanho de grão. À medida que o tempo de permanência a essa temperatura aumenta, a dissolução das fases no ferro se torna mais completa, resultando em um tamanho de grão maior. No entanto, esse aumento no tempo de exposição também acarreta em uma maior oxidação do metal. Controlando tais variáveis e ajustando-as à composição química de cada material, pode-se conferir ao aço propriedades específicas como: (i) aumento ou diminuição da dureza; (ii) melhora da ductilidade e da usinabilidade; (iii) melhora da resistência à corrosão; (iv) alteração das propriedades magnéticas e elétricas; (v) melhora da resistência ao desgaste; e (vi) aumento da resistência mecânica.

De acordo com Silva e Mei (2021), os tratamentos térmicos em ligas e aços podem variar desde temperaturas abaixo de 0°C até temperaturas na ordem de 1.280°C, além de serem empregadas diversas taxas de resfriamento, a fim de se obter a estrutura desejada. Os tratamentos térmicos comumente aplicados são: têmpera; revenimento; solubilização; normalização; e recozimento.

3.2.1 Têmpera

O tratamento de têmpera consiste em aquecer o material até a sua temperatura de austenitização, seguido de um resfriamento rápido. Os meios de resfriamento mais comuns são por meio de água, água contendo sal ou aditivos, óleo e soluções aquosas de polímeros. O objetivo final desse procedimento é o aumento da resistência mecânica. Como resultado, a microestrutura final gerada é a martensita, cuja formação é influenciada pelo teor de carbono e elementos de liga contidos no aço (CHIAVERINI, 2012; SILVA e MEI, 2021).

Os aços inoxidáveis que podem ser submetidos a esse tratamento são denominados martensíticos, caracterizados por sua capacidade de serem temperados, o que confere resistência à corrosão e ao desgaste. Esses aços geralmente possuem teores em porcentagem em massa de cromo de até 18% (CHIAVERINI, 2008).

3.2.2 Revenimento

Após a têmpera, a microestrutura do metal compreende-se parcialmente por austenita e parcialmente martensita, sendo esta última predominante. No entanto, devido à natureza dura e frágil da martensita, podem surgir trincas de têmpera quando o metal é mantido em temperatura ambiente. Nesses casos, o processo de revenimento é empregado. Esse tratamento envolve o aquecimento do aço a uma temperatura inferior a temperatura eutetóide, mantendo-o nessa temperatura por um determinado período e, em seguida, resfriando-o até a temperatura ambiente. O objetivo principal do revenimento é reduzir a fragilidade da estrutura e conferir maior estabilidade dimensional ao material (REED-HILL, 1982; SILVA e MEI, 2021).

Macedo e Manfrinato (2015) conduziram um estudo sobre a influência da têmpera e da temperatura de revenimento na resistência à corrosão do aço martensítico AISI 420. Os autores apontaram que, para esse tipo específico de aço, a temperatura ótima para a têmpera foi de 995°C. Essa conclusão está alinhada com as informações de Chiaverini (2008), que sugere que a temperatura ideal para a têmpera em aços inoxidáveis martensíticos encontra-se em torno de 1.000°C. Além disso, os pesquisadores observaram que, ao realizar o revenimento a 450°C, houve uma diminuição significativa na dureza do material. No entanto, temperaturas de revenimento superiores a essa, mostraram uma maior suscetibilidade aos processos de corrosão por *pites*. Isso se deve à difusão do cromo presente na composição química do aço para os contornos de grão, o que favorece o surgimento dessas regiões mais propensas à corrosão localizada.

3.2.3 Solubilização

A solubilização é um procedimento aplicado em ligas metálicas com o propósito de reduzir a segregação em fundidos ou dissolver precipitados ou fases específicas presentes em uma liga, podendo ser provenientes de tratamentos térmicos anteriores ou não. Nos aços inoxidáveis ferríticos, esse tratamento é empregado para dissolver a fase intermetálica sigma Fe-Cr, que se manifesta em temperaturas próximas a 1.100°C. Essa fase intermetálica é responsável pela fragilidade do aço, e a sua dissolução é essencial para melhorar as propriedades mecânicas e evitar a fragilização do material (SILVA e MEI, 2021).

Estudos realizados por Borakousk e Hupalo (2018), mostraram que com a solubilização realizada no aço AISI 430 a 1.050°C durante 30 minutos gerou a dissolução quase totalitária dos precipitados e carbeto de cromo, em comparação com as amostras não tratadas.

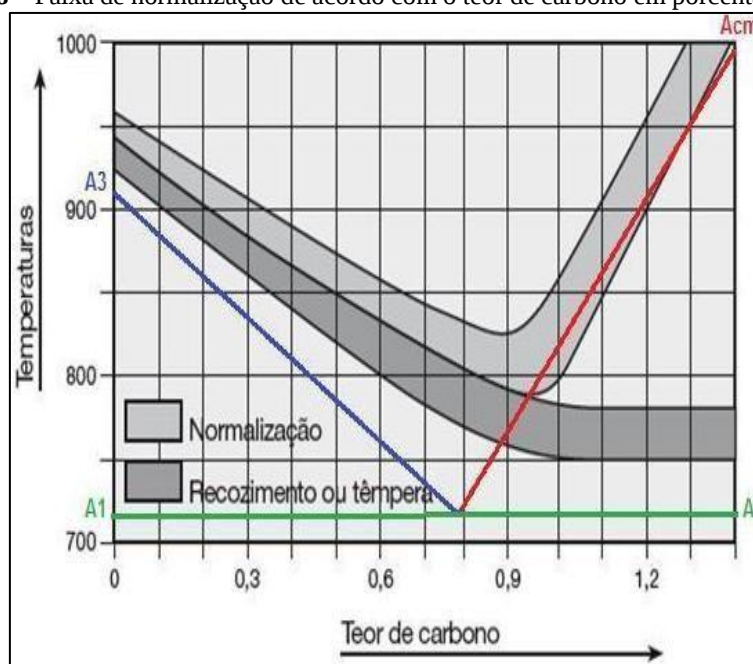
Além disso, observou-se um aumento significativo no limite de resistência à tração do aço tratado. Os autores sugerem que esse aumento está diretamente relacionado à dissolução de partículas de cromo na matriz, o que gerou uma alta concentração do elemento na solução sólida, fortalecendo o material.

3.2.4 Normalização

A normalização é um processo térmico que visa à completa austenitização do aço. É frequentemente utilizado para homogeneizar a estrutura de uma liga ou de um fundido antes da têmpera ou, ainda, após operações de forjamento ou laminação. Seu objetivo principal é a homogeneização da estrutura, além de promover o refinamento dos grãos grosseiros presentes no material. Este tratamento térmico é aplicado com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas, eliminando as heterogeneidades na estrutura do aço e otimizando sua resposta a tratamentos posteriores (CHIAVERINI, 2012; SILVA e MEI, 2021).

O resfriamento empregado é conduzido por meio de ar, seja ele estacionário ou mecanizado. A Figura 3.8 ilustra as faixas convencionais de temperaturas para o processo de normalização, considerando o teor de carbono presente no aço.

Figura 3.8 – Faixa de normalização de acordo com o teor de carbono em porcentagem massa.



Fonte: Adaptado de Silva e Mei (2021).

De acordo com a Figura 3.8, pode-se inferir que a temperatura varia em função do teor (% em peso) de carbono presente nos aços. Após a laminação a quente, alguns aços podem

apresentar empenamentos, além de quantidade volumosa de carbonetos, o que dificulta o processo de usinabilidade principalmente em aços-ligas. Uma possível solução para estes problemas é o tratamento por normalização, que conforme mencionado anteriormente, irá promover o refinamento dos grãos, eliminando completamente ou parcialmente os carbonetos presentes na estrutura (CHIAVERINI, 2012).

3.2.5 Recozimento

Quando um metal é deformado plasticamente, ocorre um aumento na resistência mecânica e na dureza, juntamente com uma redução na ductilidade, fenômeno conhecido como encruamento. Esse processo é caracterizado pela intensificação das interações nos defeitos cristalinos, como lacunas, discordâncias e outras imperfeições, que se acumulam durante a deformação plástica. As discordâncias, que são descontinuidades na estrutura cristalina, desempenham um papel crucial no aumento da resistência do material, pois a movimentação desses defeitos é dificultada devido ao seu acúmulo, o que exige maior esforço para promover a deformação adicional (CHIAVERINI, 2008).

A energia acumulada no metal durante o processo de encruamento, que mantém o material em seu estado endurecido após a deformação plástica, só pode ser superada por meio de um tratamento térmico específico, conhecido como recozimento. Esse tratamento consiste no aquecimento do metal até atingir sua temperatura de recristalização, seguida pela manutenção dessa temperatura por um período determinado, processo denominado encharque, e, posteriormente, um resfriamento. Esse procedimento visa alcançar uma ou várias características, tais como: eliminar os efeitos do encruamento, remover tensões, diminuir dureza, alterar as propriedades mecânicas, modificar as propriedades elétricas e magnéticas, ajustar o tamanho de grão, remover gases e eliminar qualquer efeito de outro tratamento térmico realizado anteriormente. Além disso, o recozimento também auxilia na dissolução de alguns elementos de liga (CHIAVERINI, 2008; CHIAVERINI, 2012).

O tratamento térmico de recozimento, conforme descrito por Chiaverini (2012), abrange uma série de processos específicos, cada um com objetivos distintos. O recozimento em caixa é um tratamento térmico amplamente utilizado para estabilização e alívio de tensões em aços inoxidáveis ferríticos. Esse processo é essencial para melhorar a ductilidade, reduzir a dureza e homogeneizar a microestrutura desses materiais, que se destacam por sua elevada resistência à corrosão e boa resistência mecânica.

Além disso, o recozimento em caixa é especialmente empregado na proteção de grandes massas ou de um grande número de peças de aço, evitando a oxidação superficial e outros efeitos indesejáveis durante o tratamento térmico (CHIAVERINI, 2012). Na Figura 3.9, é possível observar um esquema ilustrando as etapas desse processo.

Figura 3.9 – Esquema típico utilizado no recozimento em caixa.



Fonte: Adaptado de Janosec *et al.* (2007).

As etapas sequenciais consistem no aquecimento, encharque e resfriamento. Na primeira etapa o material é aquecido gradualmente até uma temperatura específica, geralmente entre 750°C e 900°C para aços inoxidáveis ferríticos, dependendo da composição do aço específico. Já no encharque, ou também conhecido como tempo de permanência, o material é mantido na temperatura de recozimento por um determinado período para garantir a recristalização completa dos grãos. Por fim, tem-se o resfriamento, dado após a manutenção, o aço é resfriado lentamente, geralmente dentro da caixa, para evitar a formação de tensões térmicas e minimizar a distorção. Conforme apresentado na Figura 3.9, três (03) ou quatro (04) bobinas são empilhadas em uma base, coloca-se um abafador (campânula) e logo após inicia-se o processo de recozimento. Visto que, para esse processo é importante um controle atmosférico dentro do forno e uniformidade da temperatura. Ao concluir o recozimento, retira-se o forno e acrescenta-se o resfriador na base. Com o resfriamento concluído as bobinas são retiradas da base e se inicia um novo ciclo (JANOSEC *et al.*, 2007).

As etapas sequenciais no processo de tratamento térmico dos aços inoxidáveis ferríticos são constituídas por três (03) fases principais: (i) aquecimento; (ii) encharque; e (iii) resfriamento. A primeira etapa, o aquecimento, envolve um aumento gradual da temperatura do material até atingir um valor específico, que geralmente varia entre 750 °C e 900 °C. Esta variação de temperatura é determinada pela composição exata do aço em questão, já que diferentes ligas podem exigir ajustes específicos para alcançar o resultado desejado. O objetivo desta fase é preparar a microestrutura do material para as transformações subsequentes (JANOSEC *et al.*, 2007).

Seguindo o aquecimento, temos a fase de encharque, também conhecida como tempo de permanência. Nesta etapa crucial, o material é mantido na temperatura de recozimento por um período predeterminado. Este tempo é cuidadosamente calculado para assegurar a recristalização completa dos grãos, um processo que é essencial para restaurar as propriedades físicas e mecânicas do aço. A recristalização ajuda a eliminar defeitos estruturais e a melhorar a ductilidade e resistência do material (JANOSEC *et al.*, 2007).

A última etapa do processo é o resfriamento. Após a manutenção na temperatura elevada durante o encharque, o aço deve ser resfriado de maneira controlada e lenta. Este resfriamento gradual costuma ser realizado dentro de uma caixa, um ambiente que ajuda a evitar a formação de tensões térmicas indesejadas e a minimizar a distorção do material. Isso é especialmente importante, pois tensões internas podem levar a falhas estruturais no futuro. O procedimento prático para este processo envolve a organização de três ou quatro bobinas, que são empilhadas sobre uma base. A seguir, um abafador, ou campânula, é posicionado sobre essas bobinas, iniciando-se o procedimento de recozimento. É imperativo que haja um controle preciso da atmosfera dentro do forno, assim como uma distribuição uniforme da temperatura, para assegurar a eficácia do processo de recozimento. Após a conclusão do recozimento, a etapa seguinte é a remoção do forno, seguida pela adição de um resfriador à base. Esta medida garante que as bobinas sejam resfriadas até a temperatura ambiente de forma segura, sem comprometer a integridade estrutural. Uma vez que o resfriamento é concluído e as bobinas são retiradas da base, o sistema está pronto para iniciar um novo ciclo de tratamento térmico, repetindo o processo para assegurar a qualidade contínua do produto final (JANOSEC *et al.*, 2007).

O recozimento em caixa pode ser utilizado após a laminação a quente e também após a laminação a frio. Quando o produto é laminado a quente para o caso dos aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos, seu objetivo é decompor toda a martensita presente na estrutura dos aços. Porém, quando o produto é proveniente da laminação a frio, o objetivo é restaurar as propriedades mecânicas do aço que foram alteradas durante o trabalho a frio. As principais variáveis de controle são a temperatura, tempo de encharque e atmosfera, esta última sendo essencial para promover uma melhor transferência de calor e reduzir a formação de óxidos durante o tratamento. A composição da atmosfera pode variar de 75% em peso de hidrogênio e 25% em peso de nitrogênio até 100% em peso de hidrogênio (FANG, 2011; CHIAVERINI, 2012; SCHMITT, 2013).

A Tabela 3.3 apresenta informações sobre temperatura e tempo de permanência utilizados em diversos estudos, nos quais os autores empregaram o tratamento térmico de recozimento.

Tabela 3.3 – Parâmetros de recozimentos utilizados em estudos com diferentes tipos de aços.

Aço	Temperatura de aquecimento (°C)	Tempo de permanência (horas)	Meio de resfriamento	Referência
AISI 430	300°C a 1.100°C	0,25 horas	Ar	(SIQUEIRA <i>et al.</i> , 2007)
ABNT 1006	700°C a 720°C	8 horas 12 horas 18 horas 24 horas	Ar	(SANTOS <i>et al.</i> , 2017)
ASTM F139	700°C	1 hora 8 horas 24 horas	Ar	(OLIVEIRA, ANTUNES e ALTOBELLI, 2018)
AISI 430 e AISI 430 Nb	600°C a 1.000°C	1 hora	Ar	(MAGALHÃES <i>et al.</i> , 2019)
Ferro fundido branco com alto teor de Cr e 0,5% de Nb	700°C	6 horas	Ao forno	(SOUZA, SILVA e PINHEIRO, 2022)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No estudo realizado por Siqueira *et al.* (2007), o aço AISI 430 passou pelo processo de recozimento, com variação de temperatura entre 300°C e 1.100°C, por um período de 15 minutos, seguido de resfriamento ao ar. As amostras estudadas foram previamente laminadas a quente em múltiplos passes, resultando em reduções de espessura de 50% e 80%. Observou-se que as amostras mais deformadas iniciaram o processo de recristalização em torno de 600°C, manifestando uma queda na dureza em comparação com as amostras tratadas em temperaturas mais baixas. A dureza que, inicialmente, era de 240 HV, diminuiu para 220 HV. Em contrapartida, as amostras que apresentaram menores deformações começaram a recristalização por volta de 700°C, apresentando uma dureza de aproximadamente 210 HV. Os pesquisadores destacaram que a 800°C houve um aumento na fração recristalizada para ambos os casos de redução, evidenciado pelos valores de dureza nas amostras tratadas a essa temperatura. Em 900°C, tanto as amostras com maiores deformações quanto aquelas com menores deformações

apresentaram uma dureza de 150 HV, indicando, segundo os autores, que a recristalização foi completa a essa temperatura.

Santos *et al.* (2017) exploraram a influência da temperatura de recozimento (entre 700°C e 720°C) e do tempo de permanência nessas temperaturas (8 h, 12 h, 18 h e 24 h) nas propriedades magnéticas do aço ABNT 1006. O tratamento térmico foi realizado utilizando o método de recozimento em caixa, uma técnica citada por Chiaverini (2012) para preservar peças de aço, reduzindo a oxidação na superfície do metal em contato com o ambiente externo. Os resultados indicaram que, com tempos de permanência mais prolongados, houve uma redução na perda magnética. Além disso, na temperatura de 720°C, observou-se uma menor perda magnética em comparação a temperatura de 700°C, mesmo quando os tempos de permanência foram os mesmos. Os pesquisadores também notaram um aumento no tamanho do grão, ao serem submetidos a maiores tempos de permanência, o que teve impactos diretos na perda magnética, bem como na resistência mecânica e ductilidade do aço.

Diferentemente do estudo anterior, Oliveira, Antunes e Altobelli (2018) se dedicaram a investigar o impacto do tratamento de recozimento na resistência à corrosão de um aço inoxidável ASTM F139. Este material é considerado um aço cirúrgico, caracterizado por uma estrutura totalmente austenítica e isenta de ferrita delta ou fase sigma. Os pesquisadores variaram o tempo de permanência em 1 hora, 8 horas e 24 horas a uma temperatura de 700°C. Os resultados revelaram que, para todas as condições estudadas, a microestrutura obtida após o tratamento era tipicamente austenítica, acompanhada de um aumento médio no tamanho de grão. Em relação à resistência à corrosão, os pesquisadores concluíram que os tempos de 1 hora e 8 horas demonstraram uma resistência superior devido à formação de um filme passivo. Esse fenômeno ocorre porque o cromo tem uma tendência preferencial para oxidar em relação ao ferro em altas temperaturas, resultando na criação de uma barreira protetora que resguarda o aço contra a corrosão (KOFSTAD, 1998).

Em um estudo conduzido por Magalhães *et al.* (2019), foi realizada uma comparação entre o aço AISI 430 e o aço AISI 430 Nb estabilizado com nióbio após recozimento a 600°C e 1.000°C por 1 hora. As amostras foram submetidas a recozimento em um forno tipo mufla, nas temperaturas e tempos mencionados, seguido por resfriamento ao ar. Posteriormente, as amostras passaram por procedimentos metalográficos e foram analisadas por meio das técnicas de Microscopia Óptica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e dureza. No tratamento a 600°C, foi observada a presença de martensita nos contornos de grão da ferrita para o aço AISI 430, atribuída pelos autores ao elevado teor de carbono (C) e nitrogênio (N) presentes no aço. Esses elementos químicos, em temperaturas elevadas, favorecem a formação

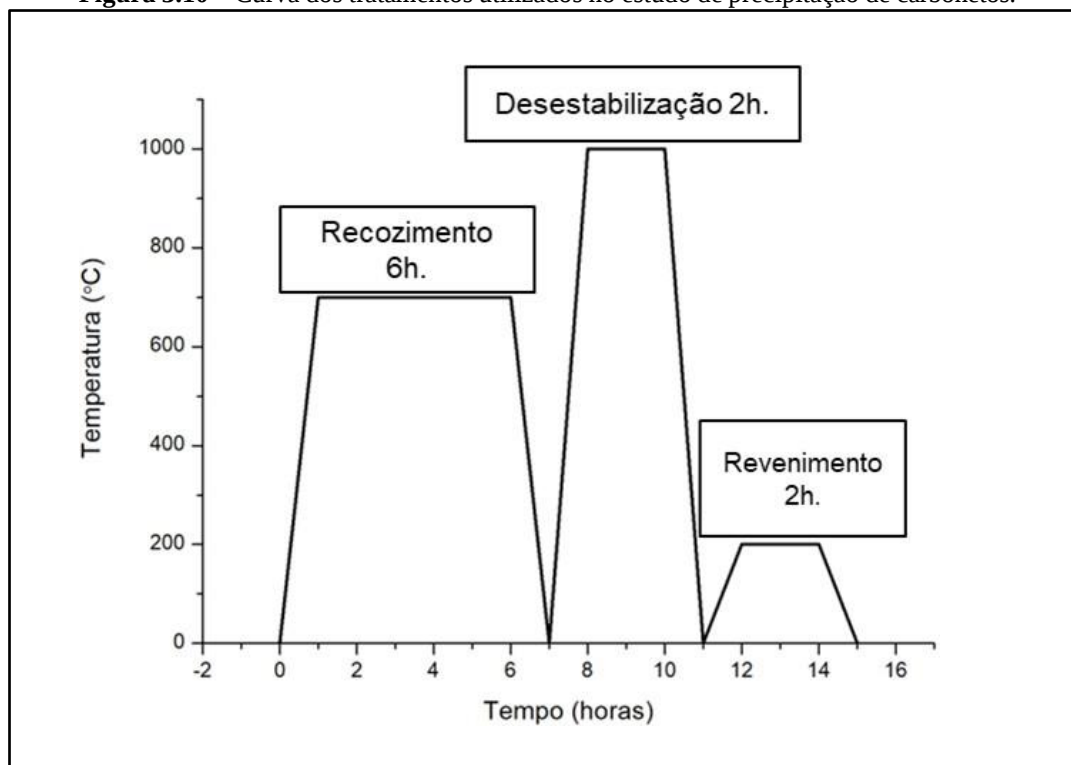
de austenita, que, ao se resfriar, transforma-se em martensita. Essa transformação não foi observada no aço estabilizado ao nióbio (Nb), indicando que o nióbio desempenha um papel crucial na estabilização do campo da ferrita em altas temperaturas, mantendo o cromo em solução sólida. Na temperatura de 1.000°C, o aço não estabilizado apresentou aumento da dureza devido à presença de martensita, enquanto o aço estabilizado tornou-se mais dúctil devido ao coalescimento dos precipitados de nióbio. É importante destacar que, de acordo com Chiaverini (2012) quanto maior o tempo de permanência, mais completa é a dissolução de precipitados e outras fases presentes no ferro.

Souza, Silva e Pinheiro (2022), investigaram a influência do tratamento de recozimento na precipitação de carbonetos e na dureza de um ferro fundido com alto teor (25,3% em peso) de cromo e 0,5% de nióbio. A liga em questão foi fundida a partir de fragmentos de rotores de bombas utilizados no setor da mineração, caracterizando-se como uma liga de Ferro Fundido Branco Alto Cromo (FFBAC) classe III contendo 0,5% de nióbio. Do material solidificado, foram obtidas 12 amostras, das quais quatro (04) foram submetidas ao recozimento, desestabilização e revenimento. Outras quatro (04) foram desestabilizadas e revenidas, e as restantes foram mantidas sem nenhum tratamento. Na Figura 3.10, é possível observar as curvas de temperaturas e os tipos de tratamento utilizados na pesquisa. Conforme indicado pelos autores, o tratamento de desestabilização, visa a precipitação de carbonetos secundários em altas temperaturas após o recozimento. A temperatura de desestabilização foi fixada em 1.050°C, com durações de 0,5 horas, 1 hora, 2 horas e, por fim, 3 horas. Após a desestabilização, os pesquisadores realizaram um tratamento térmico de revenimento a 200°C por 2 horas. O recozimento inicial foi realizado a 700°C, com um tempo de permanência de 6 horas, seguido por um resfriamento lento dentro do forno até atingir a temperatura ambiente.

Os resultados obtidos revelaram que as amostras sem tratamento exibiram em sua microestrutura colônias de perlita, acompanhadas por carbonetos eutéticos de nióbio. Nos tratamentos de recozimento e desestabilização seguidos de revenimento, foi observada uma matriz martensítica, juntamente com carbonetos secundários dispersos pela matriz. Contudo, nas amostras que passaram apenas pelo recozimento, houve uma presença mais significativa de carbonetos distribuídos de maneira mais ampla na matriz. No que diz respeito à forma dos carbonetos, nos processos de desestabilização com menor tempo, os carbonetos exibiram uma estrutura mais grosseira e de dimensões maiores quando comparados aos carbonetos formados nos tratamentos de maior duração. Essas observações sugerem que o tempo de desestabilização influencia diretamente na morfologia e na distribuição dos carbonetos na matriz, destacando a complexidade das transformações estruturais induzidas pelos tratamentos térmicos aplicados

(SOUZA, SILVA e PINHEIRO, 2022).

Figura 3.10 – Curva dos tratamentos utilizados no estudo de precipitação de carbonetos.



Fonte: Adaptado de Souza, Silva e Pinheiro (2022).

3.3 CAMADA DE ÓXIDOS

Conforme destacado por Castro *et al.* (2006), durante exposição a altas temperaturas, a oxidação na superfície dos aços ocorre por meio de uma reação com o meio externo, predominantemente na presença de oxigênio. Nesse processo, há transferência de elétrons do elemento redutor para o elemento oxidante. A formação de óxidos resulta na criação de um gradiente de concentração entre a superfície e o interior do metal base, provocando a difusão em direção à superfície.

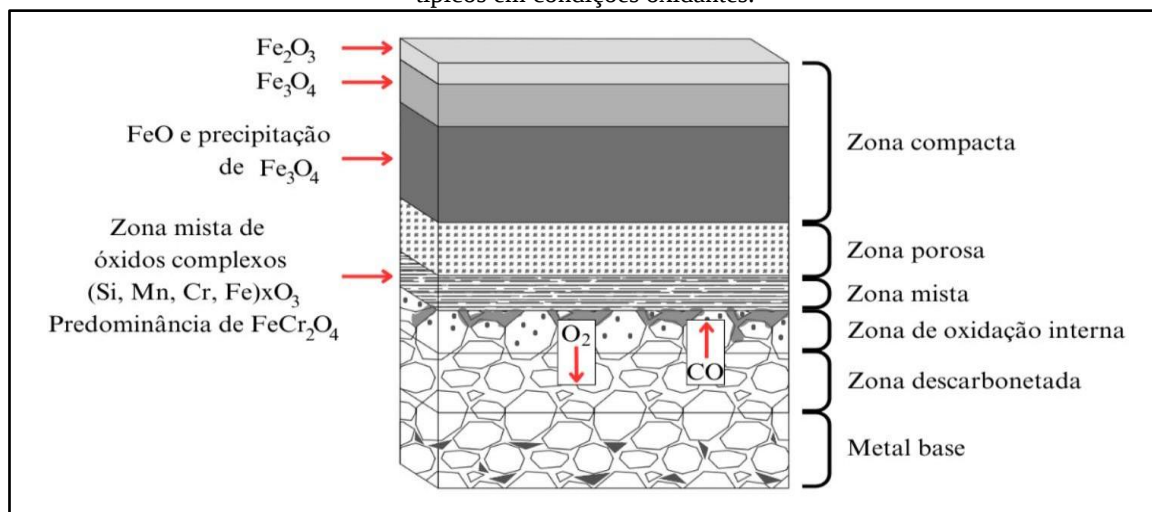
A distribuição de cada elemento na película de óxido (“carepa”) ocorrerá conforme o coeficiente de difusão específico de cada elemento, considerando que esses elementos façam parte da composição química do metal. O processo de difusão ocorre à medida que os átomos em um sólido deixam suas posições na rede cristalina, movendo-se através dos cristais presentes no aço (GOTTSTEIN, 2004; CASTRO *et al.*, 2006). Esse fenômeno é ativado quando submetido a temperaturas elevadas, como explicado por Castro *et al.* (2006) e Gottstein (2004).

Conforme destacado por Gentil (1996), devido à natureza exotérmica das reações de oxidação em aços, essas reações são favorecidas em temperaturas elevadas, na qual a variação

de energia livre de Gibbs (ΔG) é negativa, isto é, $\Delta G < 0$. Esse cenário propicia a ocorrência espontânea das reações, impulsionando a cinética da oxidação.

Como mencionado anteriormente, a propensão à formação de óxidos está diretamente ligada à energia livre de Gibbs. Em linhas gerais, quanto mais negativa for a energia livre de um elemento em uma determinada temperatura, mais favorável será a formação de óxidos desse mesmo elemento. Nos aços inoxidáveis, em particular, o cromo (Cr) tem uma propensão preferencial à oxidação em relação ao ferro. Isso resulta na formação de uma camada passiva de óxidos de cromo (Cr), que atua como uma barreira protetora contra aos processos corrosivos, evitando o contato direto do metal base com o gás oxigênio ($O_{2(g)}$). Entretanto, devido à presença de diversos elementos de liga nos aços inoxidáveis como por exemplo o cromo (Cr), o FC (Si) e o manganês (Mn), a composição do óxido formado dependerá de fatores como o potencial de oxidação, a temperatura e o tempo de exposição a condições oxidantes. Dessa forma, a permanência dos aços em processos de alta temperatura pode intensificar a oxidação (CHIAVERINI, 2012; SILVEIRA, 2017; COURA *et al.*, 2021), favorecendo a formação de diferentes óxidos, que podem ser desejáveis ou indesejáveis, dependendo do objetivo e da aplicação do material. Esses óxidos são distribuídos em zonas distintas, conforme ilustrado na Figura 3.11.

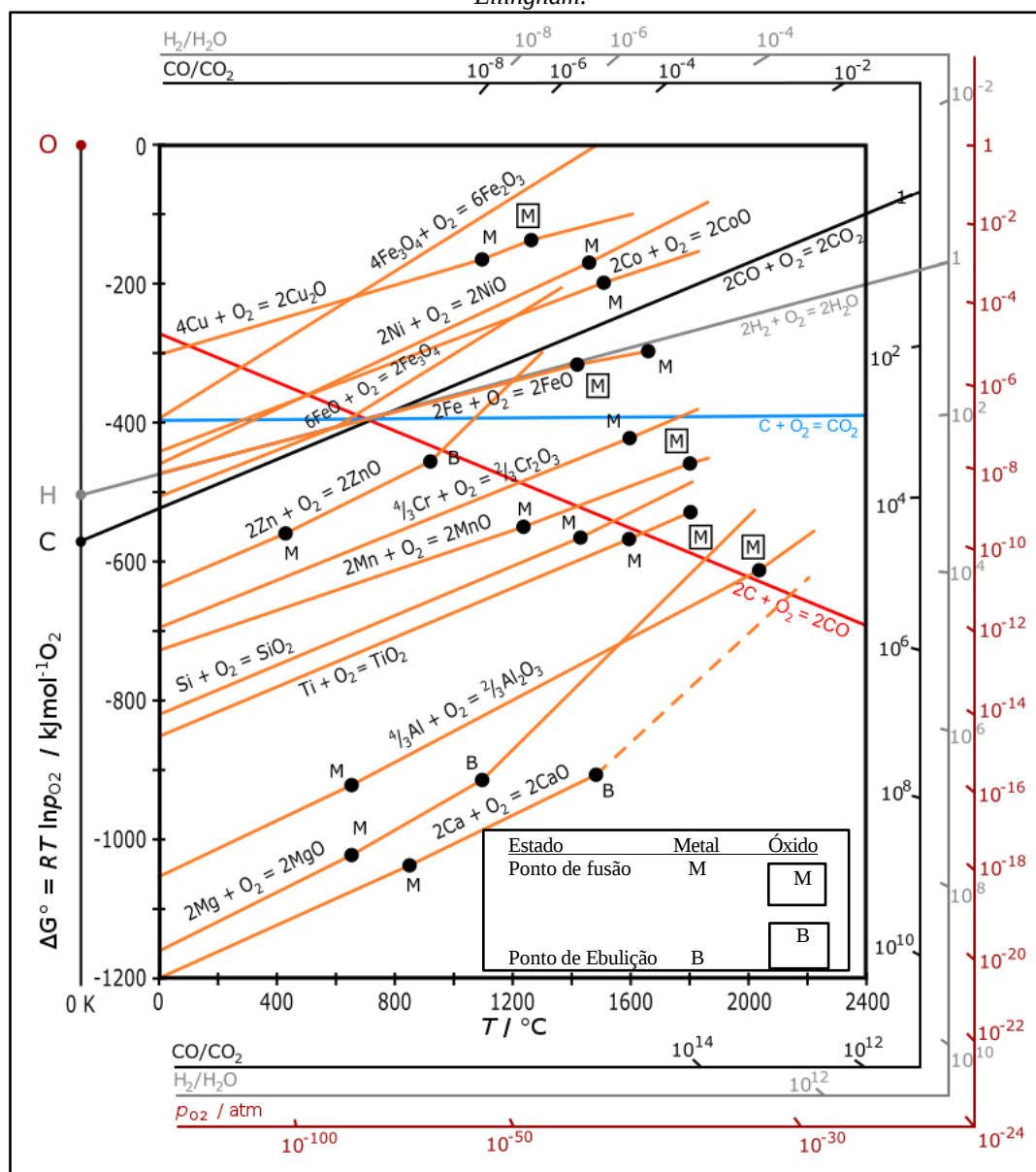
Figura 3.11 – Esquema representativo das camadas de óxidos formadas durante a oxidação de aços inoxidáveis em altas temperaturas. A imagem destaca diferentes zonas de oxidação e transformação do material. As setas indicam o fluxo de oxigênio (O_2) para dentro do material e a saída de monóxido de carbono (CO), processos típicos em condições oxidantes.



Fonte: Adaptado de Coura (2021).

Na Figura 3.12, é apresentado o diagrama de *Ellingham*, que ilustra a tendência de oxidação dos elementos em função da energia livre de Gibbs (ΔG), na qual irá ditar a preferencia de oxidação de um elemento em relação a outro (IORDANOVA *et al.*, 1998; CHIAVERINI, 2012).

Figura 3.12 – Preferência na oxidação em função na energia livre de Gibbs apresentado pelo diagrama de Ellingham.



Fonte: Adaptado de Jones (1992).

Em virtude da formação da camada passiva de óxidos de cromo (Cr), é desaconselhável manter os aços que possuem cromo (Cr) em altas temperaturas por um período mais prolongado do que o necessário. Isso se deve à natureza dos óxidos produzidos, que, devido à presença do cromo (Cr), tendem a ser de difícil remoção, conforme descritos por Chiaverini (2012) e Oliveira (2012).

Por não ser estabilizado, isto é, por não conter adições de titânio e nióbio, que estabilizam o campo da ferrita e reduzem a formação de precipitados de cromo (Cr) e carbonetos durante o tratamento térmico, o aço AISI 430 exibe uma estrutura mista de martensita e ferrita após o processo de laminação a quente. Portanto, é necessário realizar um tratamento térmico

de recozimento para decompor a martensita em carbonetos dispersos na matriz ferrítica (SCHMITT, 2013; SILVA e MEI, 2021).

O aço AISI 430 possui um teor significativo de cromo (Cr), além de outros elementos como silício (Si) e manganês (Mn), que, assim como o cromo (Cr), contribuem para a formação de óxidos complexos e fortemente aderentes à superfície. Durante o processo de recozimento, o aço AISI 430 sofre alterações na morfologia e na composição química da camada oxidada, tornando-a mais difícil de ser removida durante os procedimentos de decapagem mecânica e/ou química. Embora o AISI 430 seja amplamente utilizado em processos de estampagem, a persistência dos óxidos na superfície após a decapagem pode causar sérios prejuízos estéticos e financeiros as empresas, resultando na redução da produtividade devido à dificuldade aumentada na remoção desses óxidos (CASTRO *et al.*, 2006; BERGER e FRENN, 2016; COURA *et al.*, 2021).

O teor de silício afeta diretamente na aderência e na formação de óxidos mistos na interface metal, pois esse elemento tende a segregar-se em temperaturas elevadas. Esse processo acontece não apenas com o aumento da temperatura, mas também com a permanência prolongada em ambientes oxidantes. A existência de óxidos mistos dificulta o procedimento de decapagem (ZHAI *et al.*, 2023).

Já o manganês (Mn), em temperaturas inferiores a 800°C, manifesta uma oxidação de forma gradual e lenta, contudo, em períodos prolongados de exposição e em temperaturas mais elevadas, desenvolve óxidos complexos de remoção desafiadora, como óxido de manganês (III) (Mn_2O_3), Mn_3O_4 e o espinélio ($MnCr_2O_4$). Este último, em particular, demonstra uma intensificação notável na camada adjacente ao metal base. Dessa forma, a presença de Mn reduz o teor de cromo (Cr) nas proximidades da interface metal-óxido, o que pode representar uma preocupação significativa em relação à oxidação (SOUZA *et al.*, 2017).

O cromo (Cr) tem uma propensão à oxidação preferencial, resultando na formação de uma camada passiva nas proximidades do metal base. Contudo, à medida que o tempo avança em temperaturas elevadas, a espessura da camada oxidada aumenta, junto com sua densidade. Isso resulta na formação de um óxido compacto e altamente aderente à superfície do material, conforme observado em estudos conduzidos por Kwon *et al.* (2023). Nesses estudos, a oxidação foi investigada em aços com diferentes teores de cromo (Cr), variando de 0% em peso até 0,98% em peso. A mudança morfológica no óxido, conforme mencionado anteriormente, não foi observada no aço com 0% em peso de cromo (Cr). No entanto, à medida que o teor de cromo (Cr) aumentou, foram identificadas alterações significativas (KWON *et al.*, 2023).

Conforme descrito por Coura *et al.* (2021), em aço AISI 430 submetido a um extenso ciclo de recozimento a 840°C por 35 horas, a camada de óxido exibe uma modificação na

morfologia e composição química. Esta camada inclui FeCr_2O_4 , Cr_2O_3 na interface metálica, além de uma camada densa e aderente à superfície, enriquecida em Cr, Mn e Si. De acordo com os autores e também com Mantel (2000), essa camada, devido à sua compactidade e aderência, apresenta dificuldades na remoção durante os subseqüentes processos de decapagem.

García *et al.* (2021) investigaram a oxidação do aço AISI 430 a 800°C , variando o tempo de exposição de 42 a 50 segundos, seguido de resfriamento ao ar. Os pesquisadores empregaram amostras do mesmo aço, porém com composições químicas distintas, notadamente variando nos teores de manganês e cromo (Cr). Após o ciclo de recozimento, concluíram que as amostras submetidas a 42 e 50 segundos apresentaram uma coloração mais azulada nas bordas. Os autores atribuíram esse fenômeno ao maior teor de cromo (Cr) nessas amostras em comparação com as demais. Os elementos predominantes na camada oxidada foram cromo (Cr), manganês e silício, sendo o cromo (Cr) mais abundante nas amostras recozidas por menor tempo e o manganês predominante nas amostras recozidas por período mais longo. Em todas as amostras, identificaram-se óxidos do tipo Cr_2O_3 e MnCr_2O_4 , sendo este último mais pronunciado nas amostras recozidas por um tempo prolongado. Quanto à morfologia, as amostras com menor tempo de recozimento apresentaram cristais de óxidos sem definições claras, o que, segundo os autores, facilita a formação de trincas na camada. Em contraste, as amostras com tempos mais extensos exibiram uma camada com cristais bem definidos e mais compactos, o que, de acordo com os autores, dificulta a remoção da camada. Todas as amostras revelaram uma oxidação seletiva de Mn e Cr nas bordas do aço, resultando na formação de óxidos de Cr_2O_3 e MnCr_2O_4 . A incidência desses óxidos na superfície do metal aumentou proporcionalmente ao aumento do tempo de recozimento.

Cheng *et al.* (2015) conduziram um estudo sobre a oxidação em altas temperaturas do aço SUS 430 em ar úmido. As amostras, originárias do processo de laminação a quente, foram submetidas a tratamentos de recozimento variando o tempo de 30 minutos a 2 horas a temperaturas de 1.000°C e 1.150°C . Posteriormente, as amostras foram resfriadas ao ar até atingirem a temperatura ambiente. Os resultados revelaram que a taxa de oxidação aumenta proporcionalmente ao aumento da temperatura. Os autores destacaram que, conforme a temperatura e o tempo de exposição do metal aumentam, a cinética e o ganho de massa do óxido presente no aço também se elevam. Observou-se que a camada de óxido interna, ou seja, mais próxima ao metal, é formada independentemente da temperatura. Em relação à morfologia do óxido, os autores constataram que a camada mais próxima ao metal possui um teor elevado de cromo (Cr), enquanto a camada externa é composta principalmente por Fe_2O_3 e Fe_2O_4 .

Oliveira, Terra e Terrones (2013) investigaram o comportamento de oxidação do aço

AISI 430 submetido a recozimento a 650°C, 850°C e 1.050°C por períodos variando de 3 a 12 horas, seguido de resfriamento ao ar. A amostra tratada a 650°C exibiu uma camada de óxido mais fina em comparação com as amostras tratadas em temperaturas mais elevadas, o que dificultou a análise de sua morfologia. Por outro lado, na temperatura de 850°C por 3 horas, a morfologia apresentou-se uniforme, com microcristais de geometria poliédrica contendo cromo (Cr), ferro e oxigênio. Na amostra tratada por 12 horas a 850°C, a morfologia permaneceu uniforme, mas os microcristais assumiram uma forma mais arredondada, incorporando os elementos Cr, Fe, Mn e O em sua composição química. A 1.050°C, a camada de óxido tornou-se mais espessa com um tempo de tratamento de 3 horas, apresentando microcristais agrupados formando nódulos de maior espessura. A conclusão dos autores foi que a espessura do óxido formado aumentou com o tempo de tratamento, sendo também influenciada pelo aumento da temperatura.

Pardini (2008) apresentou uma investigação sobre o comportamento de oxidação dos aços AISI 430A durante um ciclo de recozimento de 50 horas a 850°C, 900°C e 950°C. A autora também examinou a oxidação em períodos mais curtos, variando o tempo de 5 a 40 minutos, a temperaturas entre 900°C e 1.100°C. Em ambos os casos, o resfriamento foi realizado ao ar. No ciclo de recozimento de 50 horas, observou-se um ganho constante de massa a 850°C, enquanto a 900°C e 950°C a oxidação apresentou dois estágios distintos: um ganho lento de massa no primeiro estágio e um ganho acelerado de massa no segundo estágio. Na amostra recozida a 900°C, o ganho de massa foi lento nas primeiras 14 horas de recozimento, enquanto na amostra recozida a 950°C, o crescimento lento ocorreu nas primeiras 6 horas de tratamento, após as quais o ganho de massa acelerou. Para os períodos mais curtos, verificou-se que quanto maior a temperatura, maior foi o ganho de massa da camada de óxido. No entanto, ao analisar uma temperatura por vez e variar o tempo de exposição, observou-se um ganho de massa mais significativo com tempos mais prolongados. Os resultados destacaram que tanto o tempo quanto a temperatura foram fatores impactantes no aumento da espessura do óxido, indicando um considerável aumento no ganho de massa do aço quando mantido em temperaturas estudadas por um período prolongado.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Neste estudo foram utilizadas amostras de aço com composição química padrão conforme a norma AISI 430, fornecidas pela Aperam South América. Ressalta-se que a metodologia adotada tem como objetivo principal a obtenção de dados de tratamento térmico de recozimento, que estejam mais alinhados com as práticas utilizadas na indústria. A composição química das amostras, expressa em porcentagem em peso, está detalhada na Tabela 4.1.

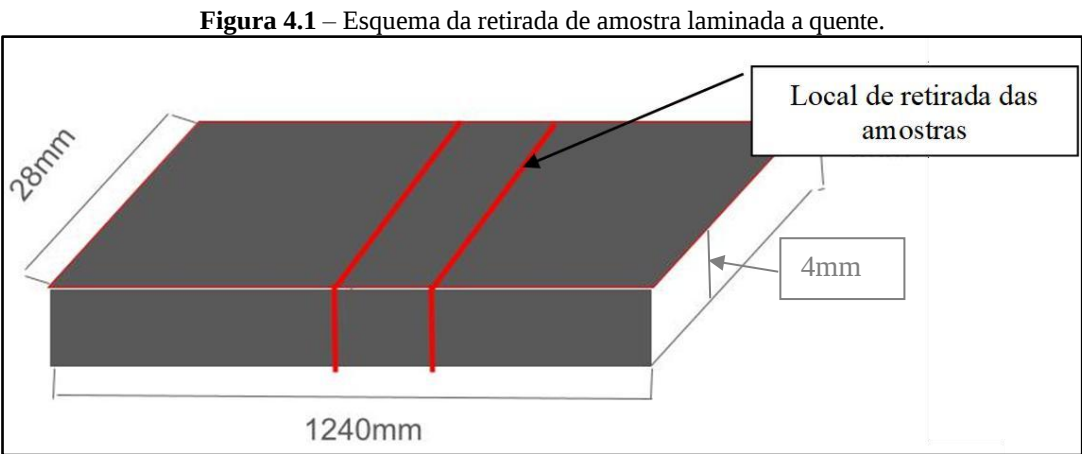
Tabela 4.1 - Composição química (% em peso) das amostras de aço AISI 430 laminado a quente.

Aço	C (%)	Cr (%)	P (%)	Ni (%)	Mn (%)	Si (%)	S (ppm)	N ₂ (ppm)
AISI 430	0,0513	16,18	0,0367	0,463	0,3629	0,2922	0,0004	0

Fonte: Aperam South América (2024).

4.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As amostras utilizadas neste estudo foram recebidas na condição de laminadas a quente, com uma espessura de 4 mm. Para a realização das análises, as amostras foram extraídas especificamente da região central da chapa, conforme ilustrado na Figura 4.1. Essa escolha se justifica pelo fato de que a região central apresenta uma homogeneidade microestrutural e composicional relativamente superior em comparação com as extremidades, onde podem ocorrer variações decorrentes do processo de laminação, como segregação de elementos, diferenças na taxa de resfriamento e possíveis descontinuidades estruturais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em seguida, as amostras foram cortadas com dimensões de 10 mm × 10 mm com o auxílio de uma morsa de bancada e a etapa de corte foi executada utilizando um arco de serra da marca *Starrett*, modelo K 140, equipado com uma lâmina de serra manual de 12" da marca *Starrett*. É relevante destacar que foram adotadas as precauções necessárias para evitar o superaquecimento da amostra durante esse processo. A etapa de corte foi conduzida nas instalações do Laboratório de Soldagem do Departamento de Metalurgia e Química (DMQ-TM), situado no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) Campus Timóteo.

Nos tópicos subsequentes, apresentaram-se os métodos utilizados para conduzir a pesquisa conforme apropriado para o estudo em questão. A seleção das amostras, os procedimentos de coleta de dados e as estratégias de análise seguiram padrões éticos e de qualidade, garantindo a integridade e a representatividade das informações coletadas. A escolha metodológica é fundamentada na natureza das questões investigativas e a viabilidade da aplicação dos métodos selecionados.

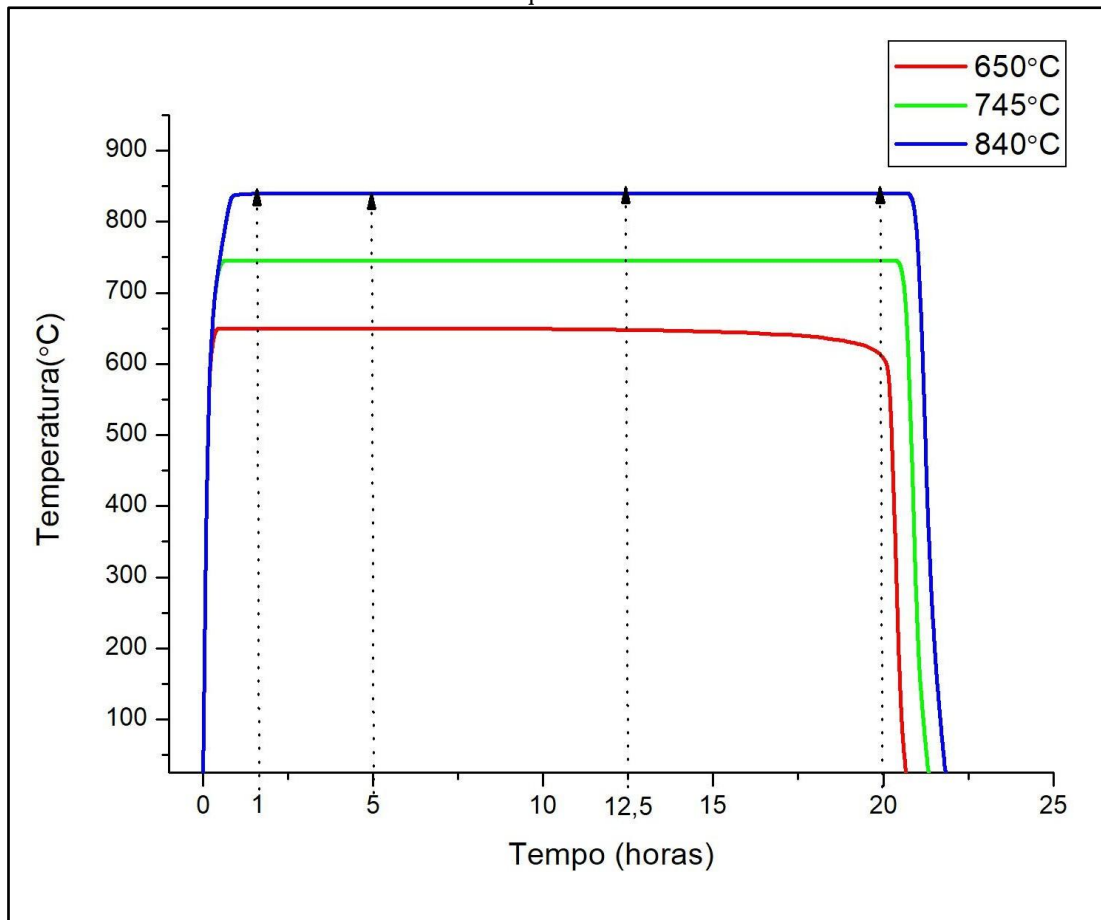
4.2.1 Tratamento térmico de recozimento

As amostras cortadas com dimensões de aproximadamente 10 mm de comprimento por 10 mm de largura, foram posicionadas em um forno tipo mufla da marca *Fornitec*, modelo F3-DM/T, o qual opera com temperatura máxima de trabalho de 1.200°C. Este processo foi realizado sem a presença de gás inerte ou gás de proteção.

As temperaturas adotadas foram de 650°C, 745°C e 840°C, variando o tempo de encharque para: 1 h, 5 h, 12h30 e 20 h para cada temperatura. A Figura 4.2 apresenta o ciclo de recozimento adotado. A etapa de tratamento térmico de recozimento foi realizada no Laboratório de Soldagem do Departamento de Metalurgia e Química (DMQ-TM), localizado no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) Campus Timóteo.

Ao término de cada intervalo de permanência, as amostras foram retiradas do forno e resfriadas ao ar até atingirem a temperatura ambiente. Para garantir a reprodutibilidade dos resultados e otimizar a realização das análises microestruturais, cada condição de tempo e temperatura foi submetida a um processo de recozimento em duplicata. Essa abordagem permitiu maior eficiência nas análises por Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Energia Dispersiva (MEV-EDS), conforme ilustrado na Figura 4.3.

Figura 4.2 – Curvas do ciclo de recozimento. Salienta-se que as linhas pontilhadas indicam os tempos de encharque adotados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.3 – Amostras recozidas após a retirada do forno.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DA TEMPERATURA E DO TEMPO NA FORMAÇÃO DA CAMADA DE ÓXIDO

As amostras para caracterização microestrutural foram preparadas seguindo os procedimentos padrão de preparação metalográfica, que incluem corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico, de acordo com as normas ASTM E3-01. A caracterização microestrutural foi realizada na seção longitudinal à direção de laminação, ao longo da espessura. Para a análise da formação da camada de óxido, as amostras foram examinadas transversalmente à direção de laminação.

As amostras foram embutidas a quente utilizando uma embutidora da marca Fotel, modelo EF-30. O lixamento foi realizado em uma politriz lixadeira metalográfica da marca Teclago, modelo PL02 E, utilizando lixas de carbetto de silício (SiC) com granulometrias variando de 80# até 1.200#. Após cada troca de lixa, as amostras foram lavadas e rotacionadas em 90° em relação ao sentido anterior de lixamento de acordo com a norma ASTM E 3. O polimento foi conduzido com a mesma politriz lixadeira, empregando um pano de polimento vermelho com granulação de 1 μm , em conjunto com uma pasta de diamante de 0,1 μm . Durante a operação, a amostra foi movimentada no sentido oposto ao da rotação da politriz. Um lubrificante da marca Fortel foi aplicado ao pano conforme necessário, para reduzir o atrito e assegurar a eficácia do polimento, preservando a integridade das amostras.

Posteriormente, as amostras foram limpas com detergente e álcool etílico a 90% e submetidas a um ataque químico com o reativo Vilella (5 mL de HCl e 1 g de ácido pícrico em 100 mL de álcool etílico a 95%). O ataque foi realizado por imersão durante 70 segundos, seguido de nova lavagem e secagem para evitar manchas. Todo o procedimento de preparação foi realizado no Laboratório de Metalografia do Departamento de Metalurgia e Química (DMQ-TM) do CEFET-MG, Campus Timóteo.

Para este estudo, foi necessário realizar a niquelagem, um processo de revestimento metálico que deposita uma camada de níquel sobre a superfície para proteger a camada de óxido durante a preparação metalográfica. O processo envolveu:

- Limpeza da amostra com acetona para remover impurezas.
- Imersão da peça em solução de sais de níquel, com um ânodo de níquel e aplicação de corrente elétrica (10 A e 0,1 V por 12 minutos) para deposição dos íons Ni^{2+} na peça.
- Certificação visual do revestimento pelo operador.
- Lavagem para remover resíduos, seguida de secagem.

Completada esta fase, as amostras foram submetidas à caracterização e à medição da espessura da camada de óxidos, utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura por Energia Dispersiva (MEV-EDS). A técnica de espectroscopia de energia dispersiva acoplado ao MEV foi aplicada para realização da análise química semiquantitativa da camada de óxido. Quando o feixe de elétrons do MEV interage com a amostra, ele pode ejetar elétrons da camada interna dos átomos, resultando na emissão de raios X característicos dos elementos presentes.

Com a conclusão desta fase, as amostras seguiram para as etapas de caracterização microestrutural e de medição da espessura da camada de óxidos por meio das técnicas de Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura por Energia Dispersiva (MEV-EDS).

4.3.1 Caracterização microestrutural por Microscopia Óptica (MO)

Para a aquisição de imagens com aumentos de 100, 200 e 400 vezes, as amostras foram encaminhadas para um Microscópio Óptico (MO) da marca *Kontrol*[®], com uma câmera de vídeo acoplada para captura de imagem da marca DIGILAB, modelo DI-5.0HD. Esta etapa foi realizada no Laboratório de Microscopia do Departamento de Metalurgia e Química (DMQ-TM), localizado no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) Campus Timóteo.

4.3.2 Caracterização da camada de óxido por Microscopia Eletrônica de Varredura por Energia Dispersiva (MEV-EDS)

As imagens obtidas por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura por Energia Dispersiva (MEV-EDS) (Tescan[®], modelo VEGA 3) foram provenientes dos Elétrons Secundários (SE), operando em aceleração de voltagem de 20 kV. A partir da Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) foram realizadas microanálise química em diferentes regiões da

amostra, incluindo a região que está localizada a camada de óxidos. A etapa de caracterização via MEV-EDS foi realizada em parceria com o Centro de Pesquisa da Aperam South América, localizada na cidade de Timóteo, Minas Gerais.

4.4 ENSAIO DE DUREZA VICKERS

O durômetro Vickers, da marca TIME-Digital Metallic Hardness Test, modelo TH710, foi utilizado nos procedimentos experimentais. Este equipamento emprega um penetrador de diamante com geometria de pirâmide de base quadrada. Durante o ensaio, foi aplicada uma carga de aproximadamente 9,81 N por 15 segundos. Foram realizadas sete (07) indentações para cada condição avaliada de forma aleatória nas amostras embutidas ao longo da seção longitudinal da direção de laminação a quente. Esta etapa foi realizada no Laboratório de Microscopia do Departamento de Metalurgia e Química (DMQ-TM), localizado no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) Campus Timóteo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

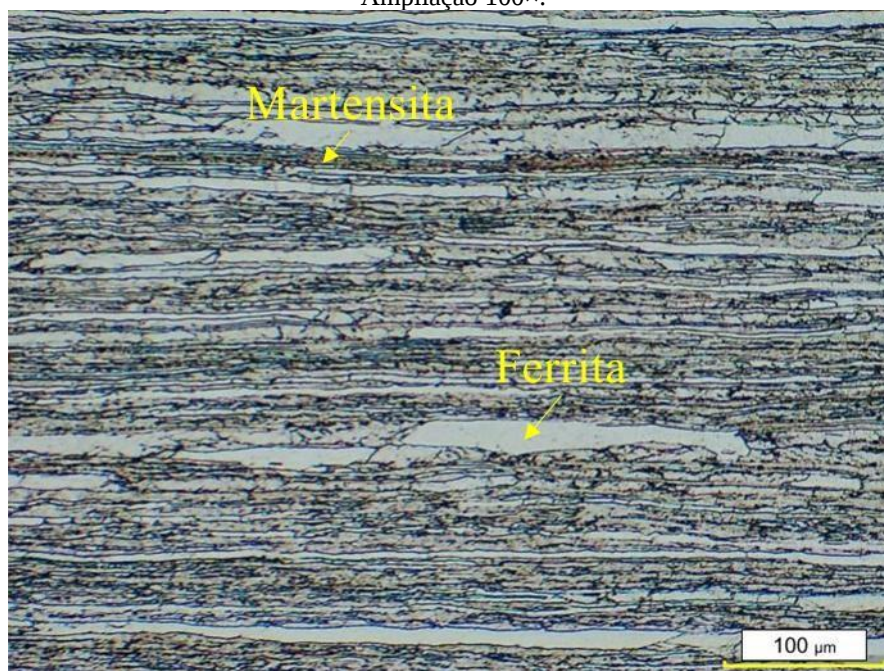
Neste capítulo, foram apresentados e analisados os dados obtidos ao longo da investigação sobre a caracterização microestrutural de amostras submetidas a tratamentos térmicos de recozimento. Inicialmente, foram descritas as microestruturas observadas antes do tratamento térmico, estabelecendo uma referência para comparações posteriores. Em seguida, foram detalhados os efeitos das diferentes temperaturas (650°C, 745°C e 840°C) e tempos de permanência (1 h, 5 h, 12h30 e 20 h) no comportamento dos materiais.

As análises morfológicas e químicas da camada de óxidos formada revelaram variações significativas entre os ensaios, permitindo uma discussão sobre as implicações desses resultados no contexto teórico e prático. Este capítulo teve como objetivo não apenas apresentar os dados de forma clara e precisa, mas também integrá-los à literatura existente, contribuindo para um entendimento mais aprofundado dos fenômenos observados.

5.1 MATERIAL COMO RECEBIDO

O aspecto geral da microestrutura do aço inoxidável ferrítico AISI 430, na condição em que foi recebido, ou seja, sem tratamento térmico, é ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Micrografia da amostra AISI 430 sem tratamento térmico, obtida por microscopia óptica a 25°C. Ampliação 100×.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na análise da Figura 5.1, observa-se a presença de grãos ferríticos com características finas e alongadas, além da formação de martensitas alinhadas na direção da laminação a quente. Estes resultados estão em consonância com os encontrados por Cordeiro (2023), que explica que, quando o aço inoxidável ferrítico AISI 430 é submetido a aquecimento acima de 1.000°C seguido de um resfriamento rápido, a microestrutura resultante é composta por uma combinação de ferrita e martensita. Este fenômeno ocorre devido à presença de carbono (C) e nitrogênio (N), que favorecem a transformação da ferrita em austenita em temperaturas superiores a 900°C. A quantidade desses elementos, associada ao tratamento térmico, facilita a formação da martensita durante o resfriamento rápido, como evidenciado na amostra analisada.

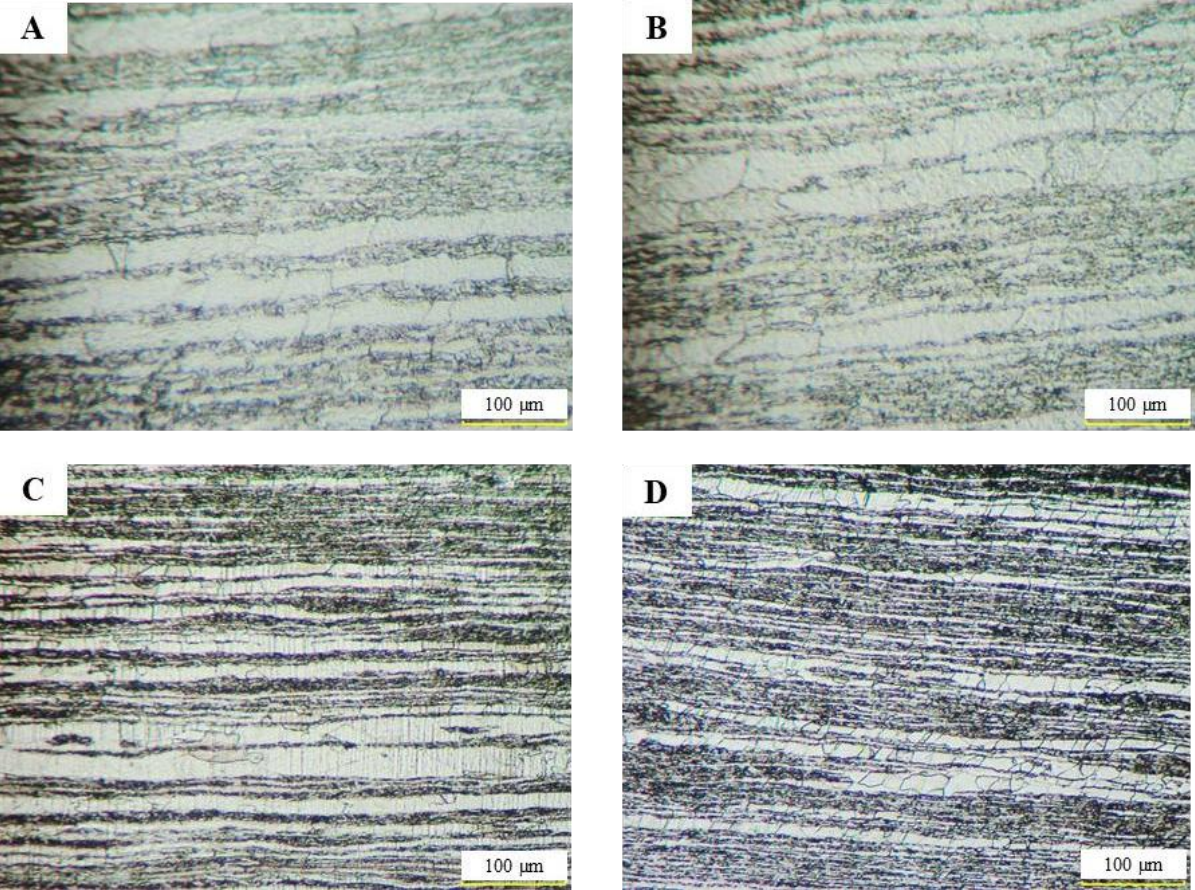
5.2 EFEITO DOS TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS NA MICROESTRUTURA

5.2.1 Tratamento isotérmico a 650°C

O material submetido a tratamento térmico a 650°C não apresentou alterações significativas em sua microestrutura. As microestruturas, ilustradas nas Figuras 5.2-A a 5.2-D, evidenciaram a presença de grãos alongados, com alguns indícios de início de recristalização, observados pelo surgimento de novos contornos de grãos. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que a temperatura de 650°C é relativamente baixa para promover uma recristalização completa nos aços inoxidáveis ferríticos, os quais, em geral, requerem temperaturas mais elevadas para ativação dos mecanismos de movimento de discordâncias e nucleação de novos grãos.

Nota-se um aumento nas fases mais claras (mais brilhantes), correspondentes à ferrita, na amostra submetida ao tratamento térmico, quando comparada à amostra sem tratamento (Figura 5.1), ambas analisadas sob a mesma ampliação de 100×. No que diz respeito às fases mais escuras, os resultados indicaram uma redução da martensita após o tratamento térmico a 650°C. No entanto, o tempo de tratamento teve um impacto limitado na dissolução dessa fase, conforme evidenciado e corroborado pelos resultados de dureza Vickers apresentados na Tabela 5.1. Essa análise sugere que, embora o tratamento térmico a 650°C provoque alterações na microestrutura, a cinética de dissolução da martensita é limitada pela duração da exposição à referida temperatura.

Figura 5.2 – Micrografias das amostras AISI 430 submetidas ao tratamento térmico de recozimento isotérmico a 650°C, com diferentes tempos de encharque, obtidas por microscopia óptica a 25°C: **(A)** 1 hora, **(B)** 5 horas, **(C)** 12h30 e **(D)** 20 horas, com ampliação de 100×.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 5.1 – Valores de dureza Vickers das amostras AISI 430 recozidas a 650°C e da amostra sem tratamento (ST). Cada valor apresentado é resultado de uma média obtida a partir de sete (07) medições realizadas para cada condição.

Temperatura (°C)	Tempo de encharque (h)	Média	Desvio padrão
650	ST	330,50	4,2
	1	271,3	5,2
	5	263,1	9,1
	12,5	252,2	7,1
	20	257,2	9,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

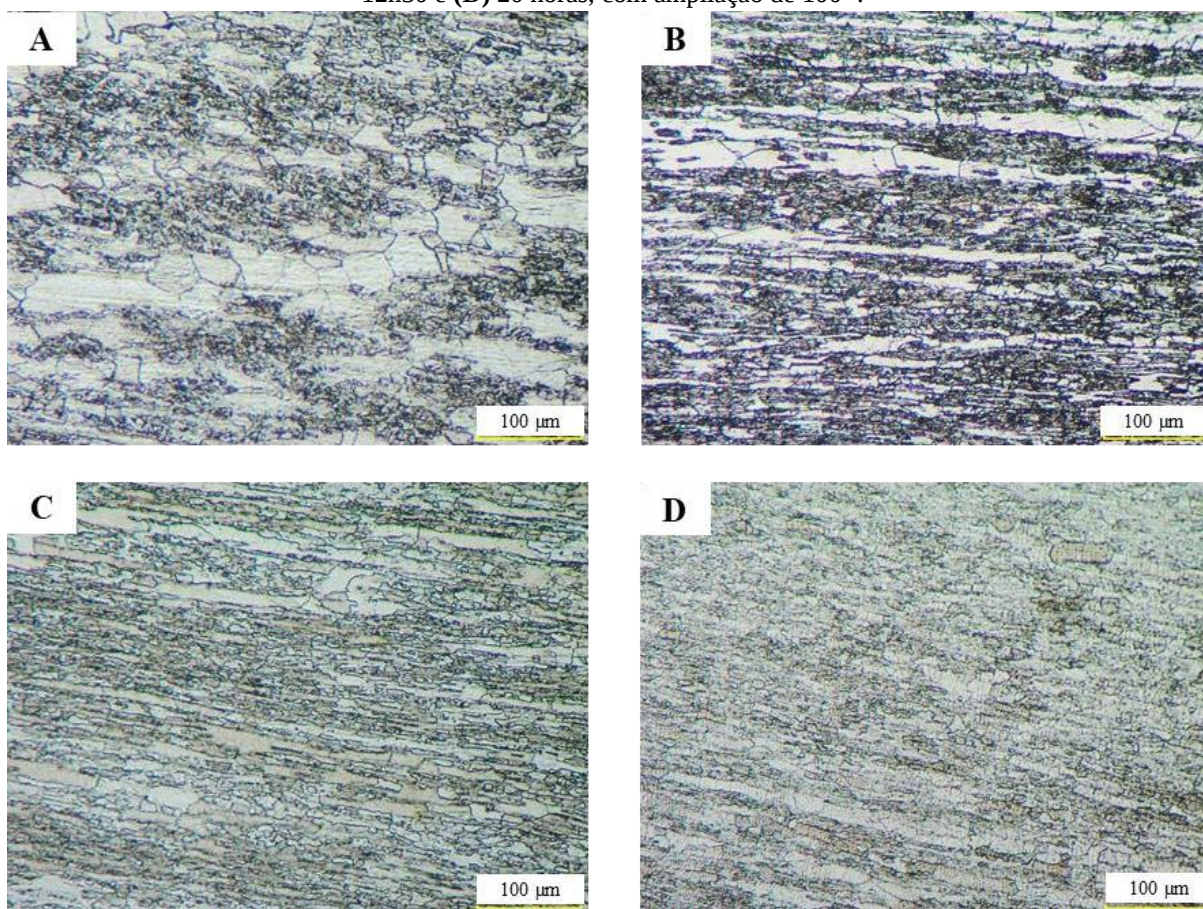
Os resultados obtidos corroboram os dados encontrados por Siqueira *et al.* (2007), que investigaram o efeito do recozimento no aço AISI 430 com estrutura colunar de grãos laminado a quente. Segundo os autores, a recristalização inicia-se acima de 600°C; entretanto, não foi

observada uma diferença significativa nas durezas das amostras tratadas a temperaturas abaixo de 700°C.

5.2.2 Tratamento isotérmico a 745°C

As micrografias das amostras tratadas termicamente a 745°C, com tempos de encharque de 1 h, 5 h, 12h30 e 20 h, estão apresentadas nas Figuras 5.3-A a 5.3-D.

Figura 5.3 - Micrografias das amostras AISI 430 submetidas ao tratamento térmico de recozimento isotérmico a 745°C, com diferentes tempos de encharque, obtidas por microscopia óptica a 25°C: **(A)** 1 hora, **(B)** 5 horas, **(C)** 12h30 e **(D)** 20 horas, com ampliação de 100×.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os diferentes intervalos de tempo de tratamento térmico revelaram variações notáveis na microestrutura do material. Nas amostras submetidas a tempos de encharque mais curtos, de 1 e 5 horas, observou-se a presença de grãos relativamente maiores em comparação às amostras tratadas a 650°C. No entanto, mesmo para esses tempos de encharque, ainda foi perceptível a presença de fases escuras (menos brilhantes), sugerindo que, embora a temperatura de 745°C seja mais elevada, o tempo de 1 e 5 horas não foi suficiente para eliminar completamente a

martensita da microestrutura. Esta observação indica que são necessários tempos de encharque mais longos ou ajustes nas condições de tratamento para alcançar uma homogeneização microestrutural completa.

Para o tempo de encharque de 12h30, não foi possível identificar a presença de fases escuras (menos brilhantes) na microestrutura. Observou-se apenas alguns carbonetos dispersos pela matriz ferrítica. Isso sugere que, a essa temperatura, para tempos superiores a 12,5 horas, toda a martensita presente na microestrutura foi convertida em carbonetos, os quais se difundiram ao longo da matriz ferrítica.

Para os tratamentos realizados com tempo de encharque de 12,5 horas, observa-se uma queda significativa na dureza, indicando uma recristalização completa, conforme reportada na Tabela 5.2. Este comportamento é esperado, pois, à medida que o tempo de exposição à temperatura de 745°C aumenta, ocorre uma reorganização dos átomos, resultando em uma diminuição da quantidade de defeitos na estrutura cristalina, o que geralmente reduz a dureza do material. Para um tempo de encharque de 20 horas, verificou-se um leve aumento na dureza, possivelmente devido ao aumento na formação de carbonetos. Segundo Krauss (2015), no aço AISI 430, a formação de carbonetos de cromo (Cr) entre as temperaturas de 500°C a 890°C ocorre de forma preferencial, sendo influenciada principalmente pelo tempo de exposição a estas temperaturas, o que pode explicar o aumento observado na dureza. Esta formação de carbonetos proporciona um endurecimento secundário na matriz ferrítica, alterando as propriedades mecânicas do material.

A Tabela 5.2 apresenta o comportamento da dureza em função do tempo de encharque a 745°C.

Tabela 5.2 – Valores de dureza Vickers das amostras AISI 430 recozidas a 745°C. Cada valor apresentado é resultado de uma média obtida a partir de sete (07) medições realizadas para cada condição.

Temperatura (°C)	Tempo de encharque (h)	Média	Desvio padrão
ST		330,50	4,2
745	1	259,3	5,8
	5	215,6	5,3
	12,5	194,6	5,1
	20	205,5	5,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

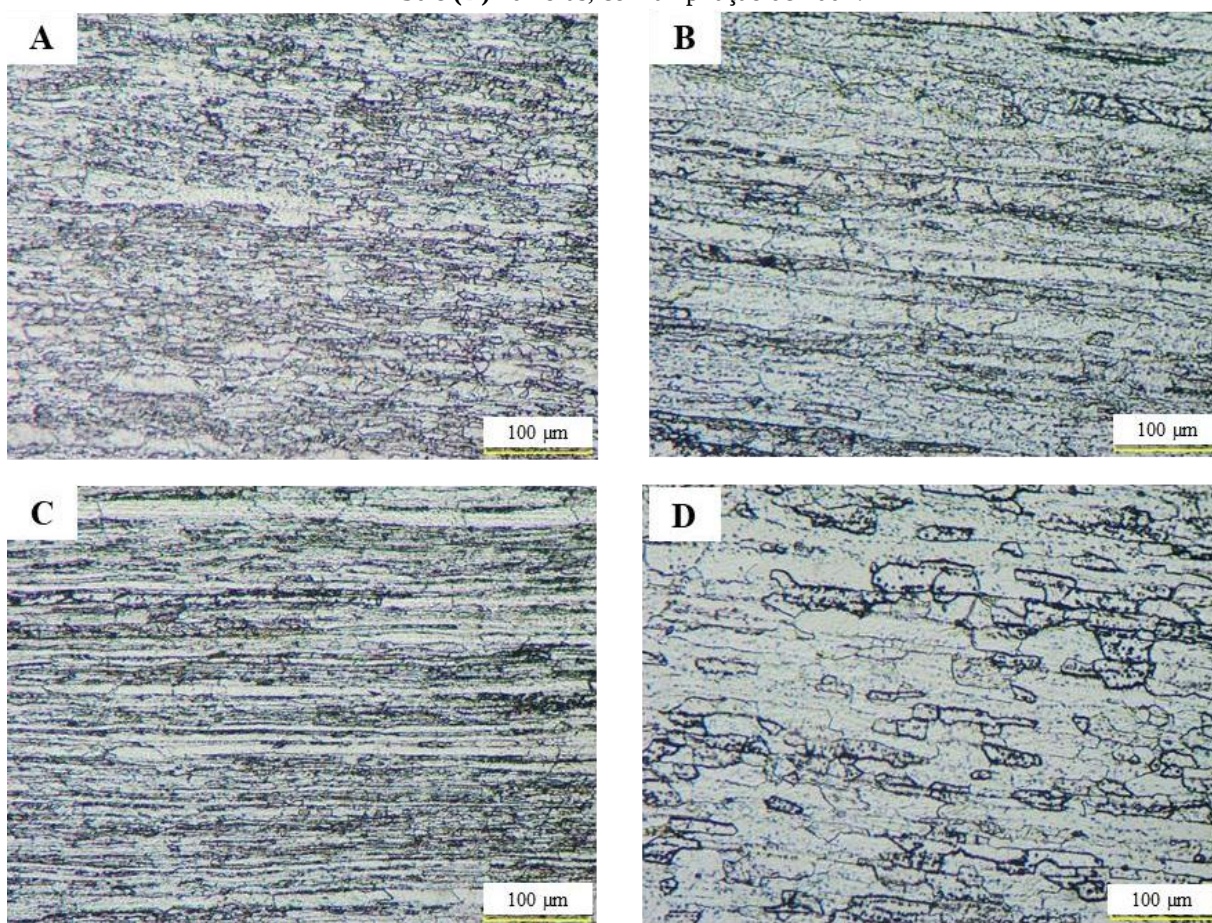
De posse dos resultados apresentados na Tabela 5.2, pode-se inferir que o tempo de encharque é um fator crítico na transformação e homogeneização da microestrutura, afetando

diretamente as propriedades mecânicas do material.

5.2.3 Tratamento isotérmico a 840°C

As micrografias das amostras submetidas a tempos de encharque de 1 h, 5 h, 12h30 e 20 h estão apresentadas nas Figuras 5.4-A a 5.4-D.

Figura 5.4 – Micrografias das amostras AISI 430 submetidas ao tratamento térmico de recozimento isotérmico a 840°C, com diferentes tempos de encharque, obtidas por microscopia óptica a 25°C: **(A)** 1 hora, **(B)** 5 horas, **(C)** 12h30 e **(D)** 20 horas, com ampliação de 100×.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nas imagens apresentadas nas Figuras 5.4-A a 5.4-D, observa-se que, em todos os períodos de tratamento térmico, não há presença de microestruturas escuras (menos brilhantes) típicas da martensita. Esses resultados são corroborados pelos valores de dureza listados na Tabela 5.3, os quais indicaram que, com tempos de tratamento de 1 h, 5 h e 12h30, não ocorreram mudanças significativas nas propriedades mecânicas do material. Cordeiro (2023) e Siqueira *et al.* (2007) também demonstraram que, em temperaturas entre 750°C e 900°C, não houve alterações significativas nos valores de dureza. Isso sugere que, nessas condições, ocorre

uma recristalização completa e que tempos mais longos de encharque não exercem grande influência sobre o material.

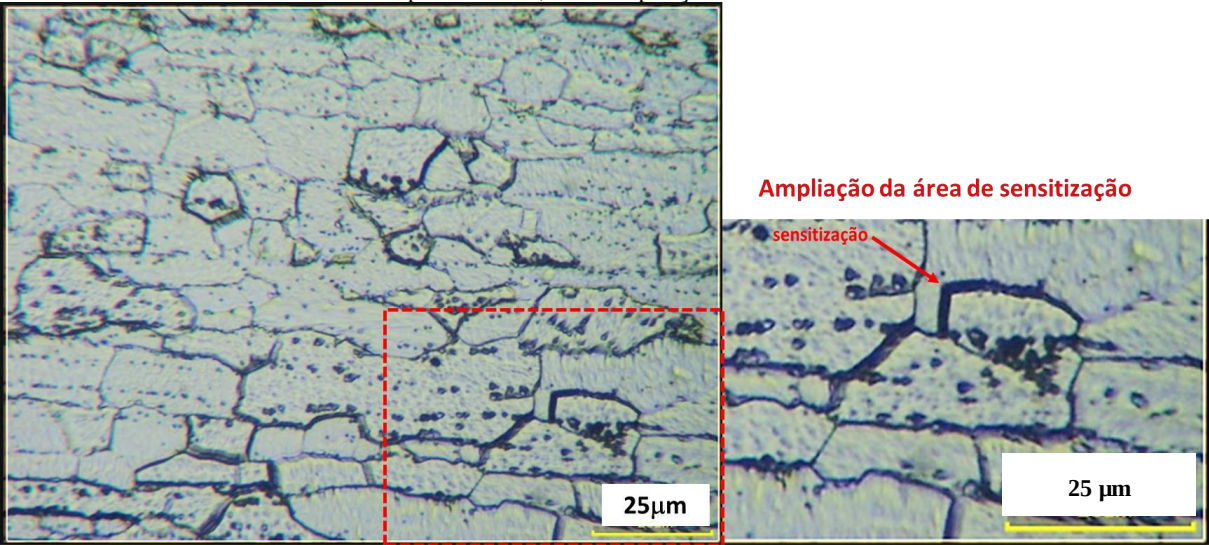
Tabela 5.3 – Valores de dureza Vickers das amostras AISI 430 recozidas a 840°C. Cada valor apresentado é resultado de uma média obtida a partir de sete (07) medições realizadas para cada condição.

Temperatura (°C)	Tempo de encharque (h)	Média	Desvio padrão
840	ST	330,50	4,2
	1	189,6	4,7
	5	188,1	6,9
	12,5	187,6	6,1
	20	177,9	2,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para o maior tempo de tratamento, de 20 horas, observou-se uma concentração significativa de carbonetos, especialmente em tratamentos com tempos de 12h30 e 20 h. Esses carbonetos se distribuem por toda a matriz, mas tendem a se acumular preferencialmente nos contornos de grãos, conforme ilustrado na Figura 5.5. A presença de carbonetos nos contornos de grãos pode ter implicações significativas nas propriedades de resistência à corrosão desse material.

Figura 5.5 – Micrografia da amostra AISI 430 submetida a 20 horas de encharque, obtida por microscopia óptica a 25°C, com ampliação de 400×.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que os contornos de grãos apresentam maior ataque químico devido ao tratamento isotérmico de 20 horas, caracterizando um processo de sensitizerização. Esse fenômeno

é provocado pela precipitação de carbonetos de cromo (Cr_{23}C_6) nos contornos de grãos, resultando em um empobrecimento de cromo (Cr) nessas regiões. Conforme afirmado por Cunha *et al.* (2016) e Serna (2006), esse processo ocorre devido à rápida difusão do carbono em temperaturas entre 500°C e 800°C, o que favorece a precipitação de carbonetos de cromo (Cr). Consequentemente, as áreas dos contornos de grãos e suas vizinhanças tornam-se empobrecidas em cromo (Cr), o que as torna suscetíveis à corrosão intergranular quando expostas a ambientes corrosivos.

5.3 EFEITO DOS TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS NA CAMADA DE ÓXIDO

5.3.1 Influência da temperatura e tempo de permanência na espessura da camada de óxido

Os resultados relativos à espessura da camada de óxido estão apresentados na Tabela 5.4, a qual detalha as amostras submetidas a diferentes tempos e temperaturas de recozimento.

Tabela 5.4 – Tamanho médio da camada de óxido (μm) de acordo com o tempo e temperatura de recozimento.

Temperatura (°C)	Tempo (h)	Tamanho médio da camada (μm)
650	1	10,68
650	5	12,62
650	12,5	13,21
650	20	17,35
745	1	10,98
745	5	13,04
745	12,5	18,16
745	20	29,42
840	1	13,54
840	5	14,24
840	12,5	26,51
840	20	38,47

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A partir da análise desses dados permitiu avaliar a influência das variáveis de tratamento térmico na formação e no crescimento da camada de óxido, um fator crítico para a resistência à corrosão e outras propriedades superficiais dos materiais metálicos. Observou-se

que, com o aumento do tempo e da temperatura de recozimento, a espessura da camada de óxido apresentou uma tendência de incremento, o que sugere uma maior difusão de oxigênio na matriz do material. Esse comportamento é significativo para a otimização de processos industriais destinados a melhorar a durabilidade e a resistência dos componentes metálicos.

Os resultados demonstraram que tanto a temperatura quanto o tempo de encharque exerceram um efeito substancial no crescimento da camada de óxido. Observando os dados da amostra recozida a 650°C, observou-se um aumento progressivo no tamanho médio da camada de óxido com o incremento do tempo de encharque: de 10,68 µm após uma hora, aumentando para 12,62 µm após 12,5 horas e alcançando 17,35 µm após 20 horas.

Para a temperatura de 745°C, o crescimento da camada de óxido foi ainda mais acentuado, passando de 10,98 µm após 1 hora de encharque para 18,16 µm após 12,5 horas e atingindo 29,42 µm após 20 horas. Em uma temperatura mais elevada, de 840°C, o recozimento resultou em camadas de óxido de 13,54 µm após 1 hora e 26,51 µm após 12,5 horas, culminando em 38,47 µm após 20 horas de encharque.

Esses resultados destacaram a influência da temperatura elevada na aceleração da cinética de crescimento da camada de óxido, atribuída à maior difusão de oxigênio na matriz metálica e à intensificação das reações de oxidação. Tais fatores são determinantes em aplicações industriais nas quais a resistência à corrosão é essencial. A otimização dos parâmetros de recozimento, portanto, pode contribuir significativamente para alcançar o desempenho desejado do material.

O comportamento observado nas três (03) temperaturas analisadas indicou que o aumento do tempo de tratamento térmico favoreceu a expansão da camada de óxido. Isso ocorre porque o processo de difusão, quando ativado ao longo do tempo, promove o crescimento contínuo dessa camada. Em temperaturas mais elevadas, como 745°C e 840°C, verifica-se que as energias térmicas fornecidas aceleram a cinética e a taxa de difusão, resultando em um crescimento mais rápido e expressivo da camada de óxido. Esses resultados estão alinhados com os achados de Pardini (2008), que, ao estudar a oxidação a quente do aço inoxidável AISI 430 em temperaturas ainda mais altas, observou um comportamento similar da camada de óxido. A autora concluiu que, em temperaturas elevadas e com tempos de exposição prolongados, houve um ganho de massa mais significativo, corroborando os achados neste estudo. Esse conhecimento é fundamental para otimizar processos de tratamento térmico visando melhorar a resistência à corrosão.

Ao comparar os efeitos da temperatura e do tempo sobre o crescimento da camada de óxido, os resultados indicaram que o tempo de exposição exerceu um impacto ainda mais

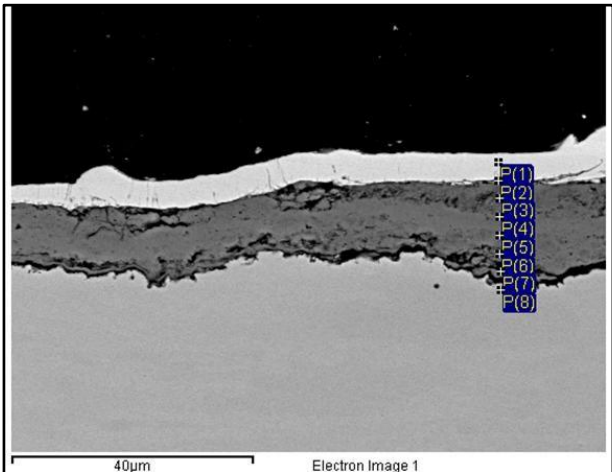
significativo do que a elevação da temperatura. Por exemplo, a diferença no tamanho da camada de óxido entre as amostras tratadas a 650°C por 1 hora e 650°C por 20 horas é de 6,67 μm . Em contraste, a diferença no tamanho da camada entre as amostras tratadas por 1 hora a 650°C e aquelas a 745°C e 840°C é de apenas 0,3 μm e 2,86 μm , respectivamente. Similarmente, ao analisar as amostras tratadas por 20 horas, observou-se que o crescimento da camada entre as amostras a 840°C e aquelas a 745°C e 650°C é de 9,05 μm e 21,12 μm , enquanto a diferença entre as amostras a 840°C tratadas por 1 e 20 horas é de 24,93 μm . Este comportamento foi igualmente observado por Cheng *et al.* (2015) e Oliveira, Terra, Terrones (2013), que concluíram em seus estudos que o tempo de tratamento é um fator mais determinante para o aumento da camada de óxido do que a temperatura. Esses dados reforçam a importância de considerar o tempo de exposição em processos que visam otimizar a formação de óxidos protetores em ligas metálicas.

5.3.2 EDS das amostras tratadas a 650°C

As Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam as imagens obtidas, acompanhadas da análise de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), realizadas nas amostras submetidas ao tratamento térmico a 650°C, com períodos de encharque de 1, 5, 12,5 e 20 horas.

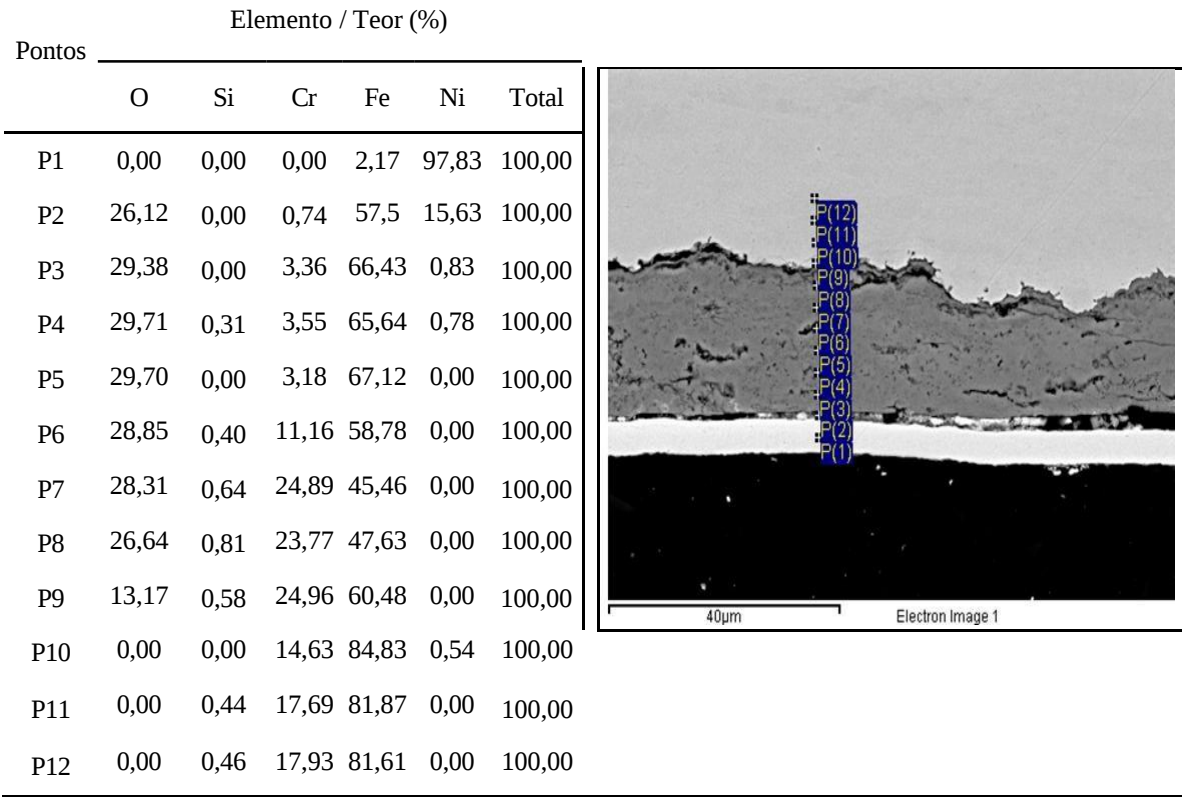
Figura 5.6 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 650°C por 1 hora de encharque.

Pontos	Elemento / Teor (%)					
	O	Si	Cr	Fe	Ni	Total
P1	0,00	0,00	0,00	1,97	98,03	100,00
P2	11,14	0,00	2,16	17,72	68,98	100,00
P3	29,45	1,28	6,61	61,43	1,23	100,00
P4	31,73	1,40	9,30	57,57	0,00	100,00
P5	28,53	0,00	13,57	57,90	0,00	100,00
P6	27,72	0,00	24,33	46,69	1,26	100,00
P7	29,61	0,77	29,89	38,50	1,23	100,00
P8	0,00	0,51	15,18	83,35	0,95	100,00



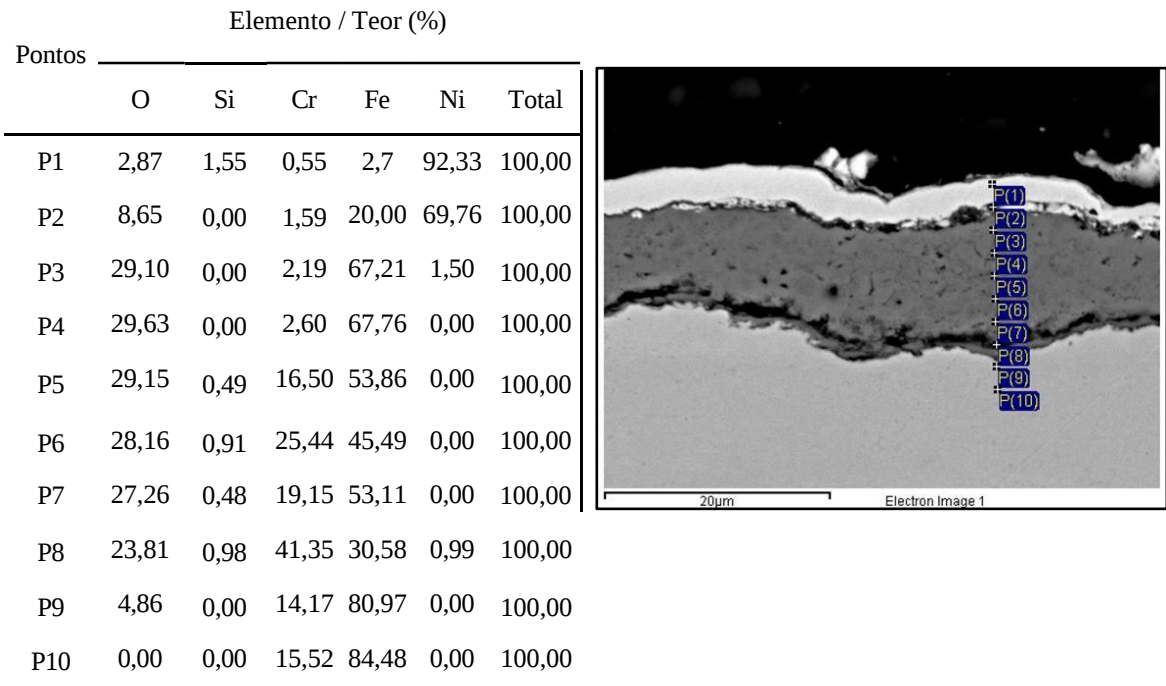
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 5.7 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 650°C por 5 horas de encharque.



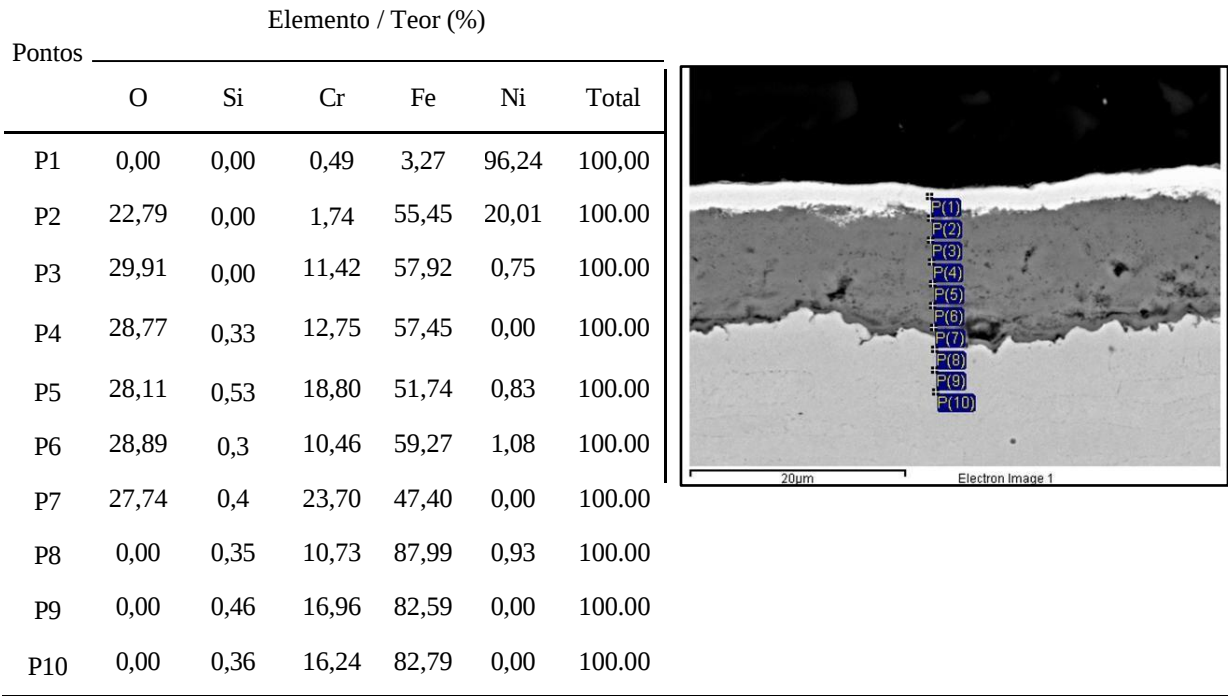
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 5.8 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 650°C por 12h30 de encharque.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 5.9 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 650°C por 20 horas de encharque.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise pontual identifica regiões específicas, sendo que o ponto (P1) representa uma área submetida à niquelagem. Esta região corresponde à parte mais externa da camada de óxido. À medida que os números dos pontos aumentam, a análise avança em direção à interface entre o óxido e o metal, até alcançar o metal base. Esta abordagem é crucial para compreender a distribuição de elementos e a formação de fases na interface, o que impacta diretamente as propriedades de resistência à corrosão e adesão da camada de óxido ao substrato metálico.

As camadas de óxidos do aço AISI 430 recozido a 650°C com tempos de encharque de 1, 5, 12,5 e 20 horas mostraram a presença de cromo (Cr), silício (Si) e ferro (Fe) no filme de óxido. O alto teor de níquel (Ni) próximo a região mais externa da camada, refere-se a camada níquel depositada por niquelagem para melhor visualização e distinção entre o filme e a baquelite.

À medida que o tempo de encharque aumenta, observou-se uma elevação no teor de ferro, especialmente nas camadas mais externas. Em contrapartida, nas camadas mais internas, próximas ao metal base, há um aumento no teor de cromo (Cr) e silício (Si), acompanhado de uma leve redução no teor de ferro, principalmente na interface metal/óxido. O teor de oxigênio permanece constante ao longo de toda a espessura da camada.

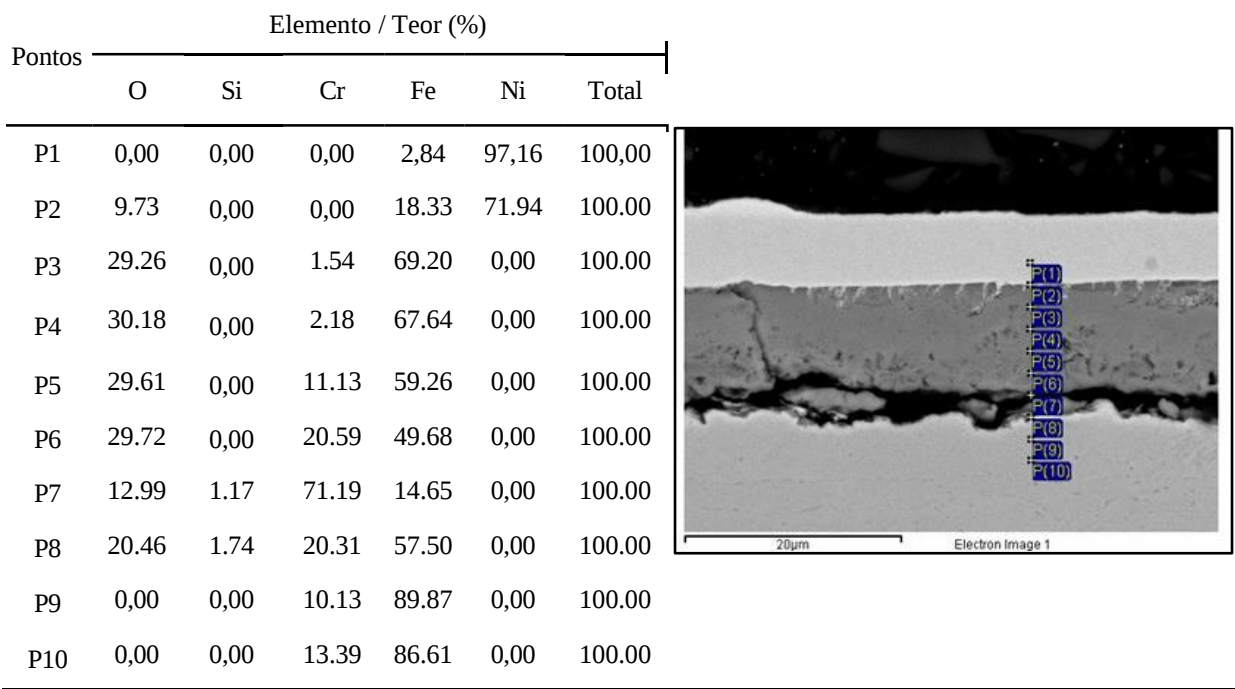
Esses resultados corroboram os encontrados por Pardini (2008), que estudou a oxidação do aço 430 A/E em tempos curtos e de até 50 horas. A autora identificou

majoritariamente cromo (Cr), silício (Si) e ferro (Fe) na camada de óxido, e por meio de análise de difração de raios X, confirmou a presença de óxidos de cromo (Cr), silício (Si) e ferro (Fe) e espinélio de Cr/Fe. Esses óxidos são cruciais para a resistência à corrosão do aço inoxidável, agindo como barreiras protetoras que impedem a progressão de processos corrosivos.

5.3.3 EDS das amostras tratadas a 745°C

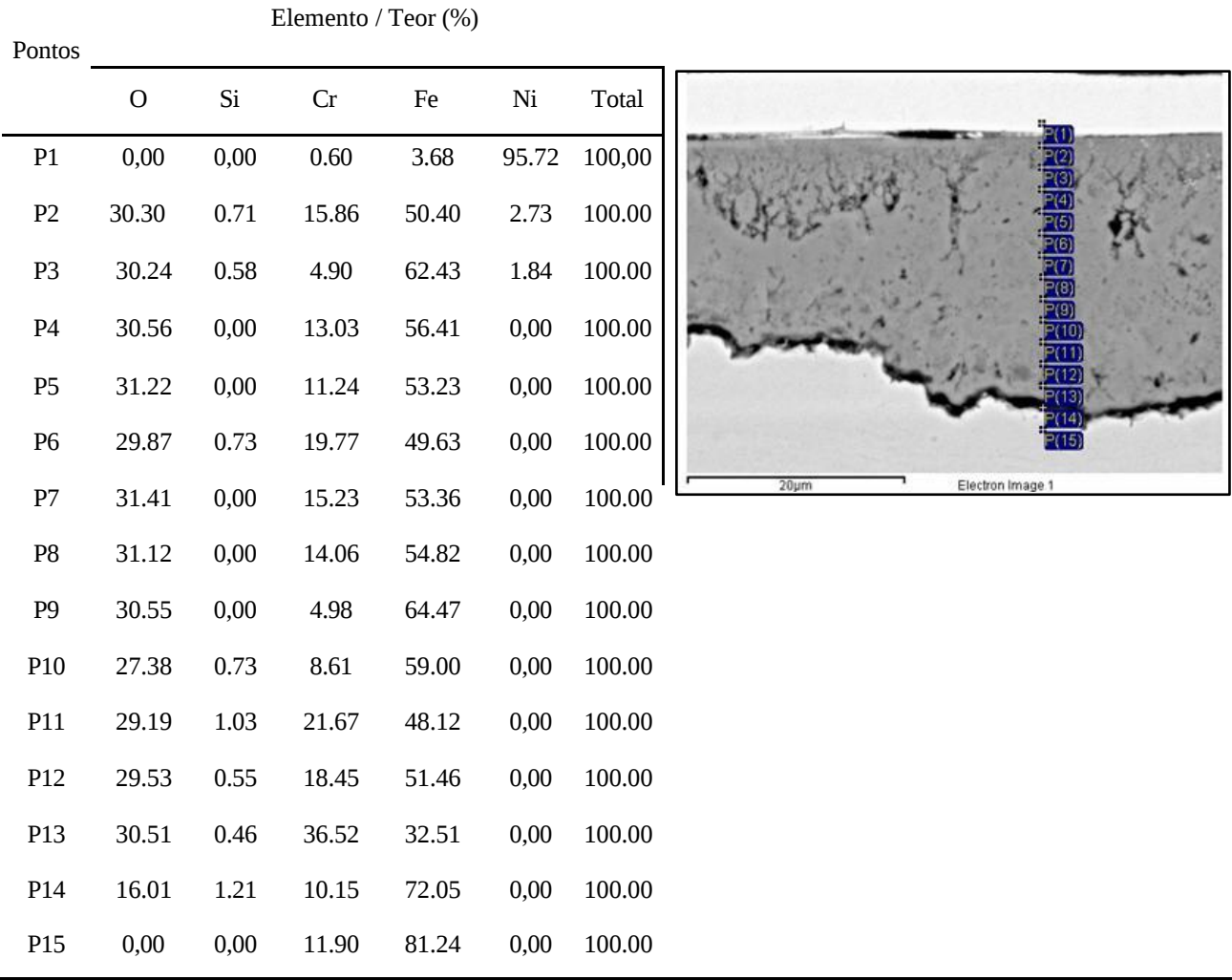
As Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam as imagens obtidas, acompanhadas da análise de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), realizadas nas amostras submetidas ao tratamento térmico a 745°C, com períodos de encharque de 1, 5, 12,5 e 20 horas.

Figura 5.10 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 745°C por 1 hora de encharque.



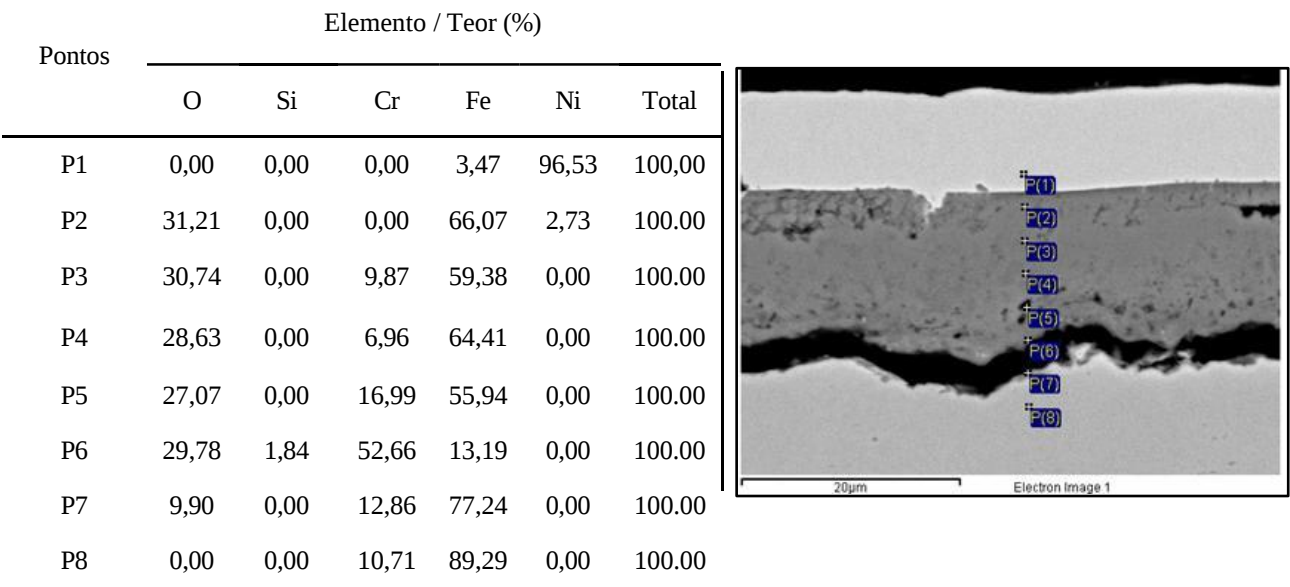
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 5.11 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 745°C por 5 horas de encharque.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

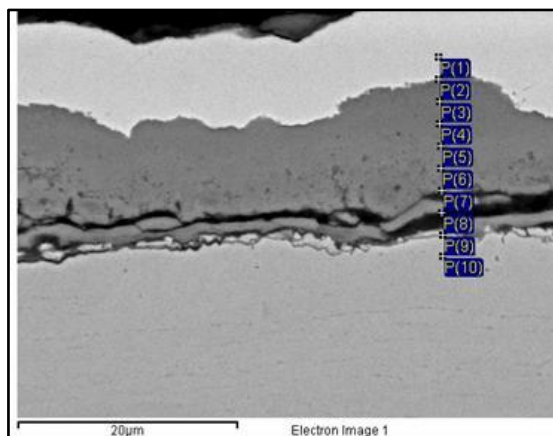
Figura 5.12 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 745°C por 12h30 de encharque.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 5.13 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 745°C por 20 horas de encharque.

Teor (%)	Elemento					Total
	O	Si	Cr	Fe	Ni	
P1	0,00	0,00	0,00	2,88	97,12	100,00
P2	18,48	0,00	0,00	27,52	53,99	100,00
P3	32,10	0,00	0,00	67,90	0,00	100,00
P4	31,18	0,00	0,00	68,92	0,00	100,00
P5	27,76	0,00	1,85	70,39	0,00	100,00
P6	28,12	0,00	2,65	69,23	0,00	100,00
P7	28,12	0,00	22,29	49,59	0,00	100,00
P8	17,2	0,00	31,16	51,65	0,00	100,00
P9	14,92	0,00	17,74	67,34	0,00	100,00
P10	0,00	0,00	10,17	89,83	0,00	100,00



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

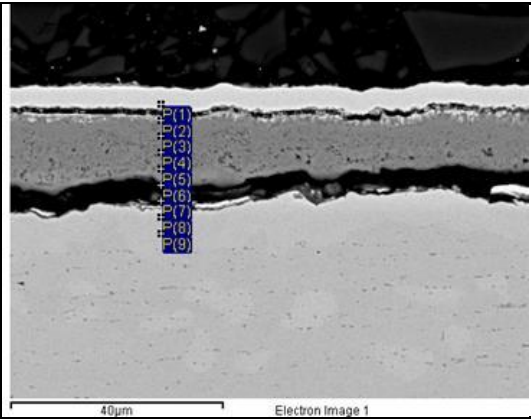
Para a temperatura de 745°C, com tempos de encharque de 1, 5 e 12,5 horas, observou-se um aumento no teor de silício e uma redução no teor de oxigênio próximo à interface metal/óxido. Curiosamente, na amostra tratada durante 20 horas, não foi detectado silício, mas há um aumento significativo de cromo (Cr) nesta região, sugerindo a formação de uma camada de oxidação interna dominada pelo espinélio Cr/Fe. Estudos realizados por Coura *et al.* (2021) e Mantel (2000) indicaram que, em temperaturas elevadas e com tempos de oxidação prolongados, há uma propensão aumentada para a formação de óxidos complexos próximos à interface metal/óxido. Além disso, foi identificado um comportamento peculiar: a ausência de óxido de manganês a esta temperatura, frequentemente encontrado em outros estudos, pode ser atribuída ao baixo teor de manganês na amostra, limitando a formação deste óxido específico.

5.3.4 EDS das amostras tratadas a 840°C

As Figuras 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 apresentam as imagens obtidas, acompanhadas da análise de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), realizadas nas amostras submetidas ao tratamento térmico a 840°C, com períodos de encharque de 1, 5, 12,5 e 20 horas.

Figura 5.14 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 840°C por 1 hora de encharque.

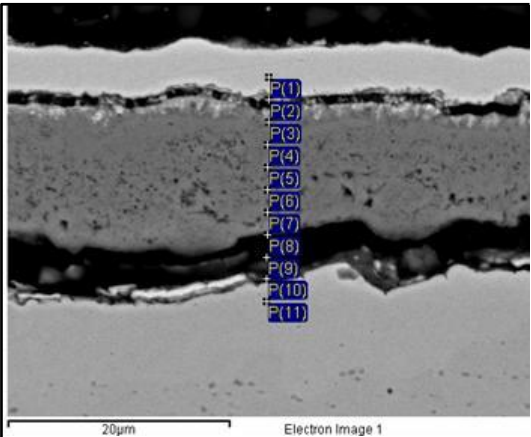
Pontos	Elemento / Teor (%)						
	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Total
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	3,07	96,30	100,00
P2	29,46	0,00	3,25	0,00	52,49	14,80	100,00
P3	31,64	0,00	2,56	0,00	65,80	0,00	100,00
P4	32,22	0,00	9,95	0,00	57,82	0,00	100,00
P5	31,286	0,00	24,09	0,00	44,63	0,00	100,00
P6	7,08	1,79	66,06	4,37	13,89	6,83	100,00
P7	17,90	3,32	46,01	2,66	14,58	15,52	100,00
P8	0,00	0,00	12,05	0,00	87,95	0,00	100,00
P09	0,00	0,00	13,70	0,00	86,30	0,00	100,00



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

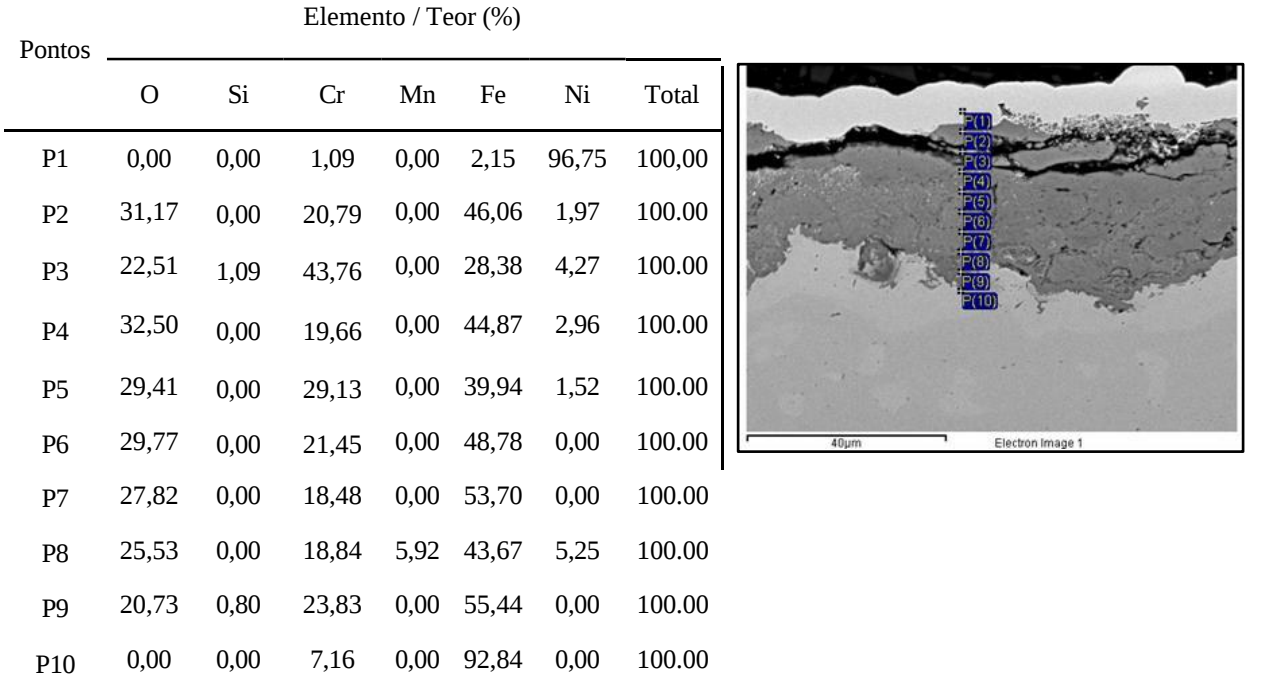
Figura 5.15 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 840°C por 5 horas de encharque.

Pontos	Elemento / Teor (%)						
	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Total
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	3,31	96,69	100,00
P2	13,99	0,00	2,07	0,00	29,29	53,99	100,00
P3	32,17	0,00	4,04	0,00	59,54	0,00	100,00
P4	30,19	0,00	5,12	0,00	64,68	0,00	100,00
P5	31,836	0,00	6,21	0,00	61,96	0,00	100,00
P6	32,48	0,00	18,66	0,00	48,00	0,00	100,00
P7	28,74	0,86	20,83	0,00	50,94	0,00	100,00
P8	6,02	0,00	61,43	0,00	19,75	10,81	100,00
P9	37,54	1,98	34,08	3,07	10,35	8,85	100,00
P10	15,37	7,10	9,37	0,00	67,79	4,96	100,00
P11	0,00	2,52	11,36	0,00	88,64	0,00	100,00



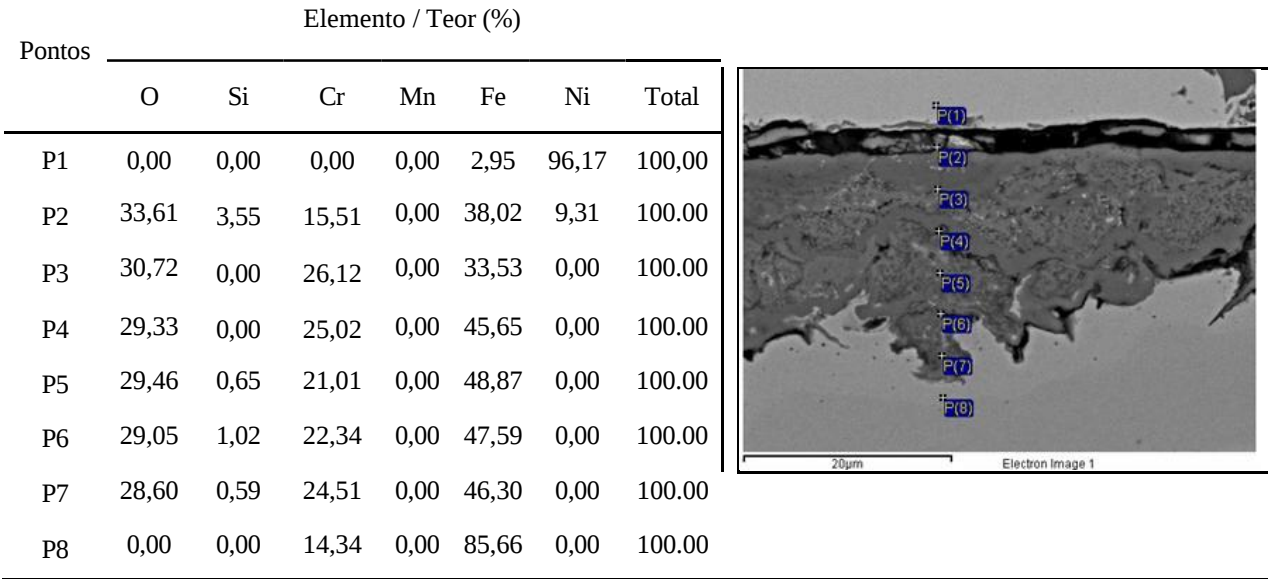
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 5.16 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 840°C por 12h30 de encharque.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 5.17 – Análise EDS da amostra AISI 430 tratada a 840°C por 20 horas de encharque.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em todos os tempos de encharque a 840°C, ao se aproximar da interface metal/óxido, observou-se uma redução significativa no teor de ferro. Em contrapartida, os teores de cromo (Cr), silício (Si) e manganês (Mn) aumentaram próximo à interface, o que indica a formação de óxidos complexos e espinélios do tipo Cr/Fe e Cr/Fe/Mn. Notou-se que, sob todas as condições de tratamento, há presença de manganês próximo à interface e que o teor desse elemento

aumenta com o prolongamento do tempo de recozimento. Estudo de Pardini (2008) e Souza *et al.* (2017) apresentaram resultados semelhantes em amostras tratadas a temperaturas superiores a 800°C, onde ambos os autores destacaram a formação de óxidos e espinélios de manganês. Souza *et al.* (2017) verificaram que, em temperaturas inferiores a 800°C, o manganês se oxida lentamente, mas, em períodos prolongados e a temperaturas mais elevadas, desenvolve óxidos complexos de difícil remoção, como o óxido de manganês (III) (Mn_2O_3), Mn_3O_4 e o espinélio (MnCr_2O_4). Este último, em particular, mostrou uma intensificação marcante na camada adjacente ao metal base. A presença de Mn, portanto, pode reduzir o teor de cromo (Cr) nas proximidades da interface metal-óxido, resultando em concentrações de cromo (Cr) abaixo de 10% em peso. Segundo Carbó (2008), esse teor é o mínimo necessário para que o cromo (Cr) forme uma camada passiva eficaz, essencial para conferir resistência à corrosão ao aço.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, observou-se que o tratamento térmico do aço inoxidável AISI 430 a 650°C e 745°C, com tempos de encharque de 1, 5, 12,5 e 20 horas, exerce impacto considerável na microestrutura e nas propriedades mecânicas do material.

- As amostras tratadas a 650°C não apresentaram mudanças expressivas na microestrutura, mas verificou-se um aumento na fração de ferrita e uma redução de martensita, especialmente em tempos mais longos de recozimento. A diminuição da dureza nas amostras recozidas, em comparação às sem tratamento, foi evidente, com uma leve queda contínua à medida que o tempo de encharque aumentava. No entanto, não foram observadas alterações significativas na dureza após 12,5 horas de encharque.
- Em condições de tratamento térmico a 840°C, as amostras demonstraram uma redução significativa nos valores de dureza após 20 horas de encharque. Apesar da presença de carbonetos na matriz, o tempo prolongado a esta temperatura pode ter promovido o coalescimento dos mesmos resultando no menor grau de dureza observado.
- A análise da camada de óxido indicou que, para todas as temperaturas investigadas, o tempo de encharque impactou significativamente o crescimento da camada, especialmente a 745°C e 840°C. Embora a temperatura tenha acelerado a difusão e o crescimento da camada de óxido, os resultados sugerem que o tempo de exposição desempenhou um papel mais relevante no aumento da espessura da camada.
- Por fim, o comportamento das amostras tratadas durante 20 horas, especialmente a 840°C, mostrou um acúmulo de carbonetos nos contornos de grãos, o que pode tornar essas regiões mais suscetíveis à corrosão intergranular. Este aspecto ressalta a necessidade de um controle cuidadoso dos parâmetros de tratamento térmico para otimizar a microestrutura e as propriedades do aço AISI 430, garantindo sua eficácia em aplicações industriais que exigem alta resistência mecânica e à corrosão.

Esses achados ressaltaram a importância do controle preciso dos parâmetros de tratamento térmico para otimizar a microestrutura e as propriedades do aço AISI 430, assegurando sua eficácia em aplicações industriais que exigem alta resistência mecânica e à corrosão.

Este estudo destaca a necessidade de investigações experimentais adicionais para explorar a cinética de oxidação de maneira mais detalhada, visando o desenvolvimento de estratégias de tratamento térmico que maximizem a resistência à corrosão sem prejudicar outras propriedades mecânicas essenciais do material. Em suma, a pesquisa contribuiu de maneira

significativa para o entendimento e aprimoramento do uso de aços inoxidáveis em ambientes industriais desafiadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGER, K.; FRENN, J. **Evolution and viability of steckel mills**, Rio de Janeiro: ABM, 2016. p.380–388.

BORAKOUSK, B.; HUPALO, M. F. Aspecto da geometria fractal na fratura de um aço inoxidável ferrítico AISI 430 após a fragilização de 475°C. *In: XXVII Encontro Anual de Iniciação Científica*. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta grossa. **Proceedings**, 2018.

CARBÓ, H. M. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações. **São Paulo: ArcelorMittal Brasil**, v.29, 2008.

CASTRO, G. M.; ROSSI, E. H.; CASTRO, L. F. A. de.; SANTOS, D. B. Caracterização da carepa em aço inoxidável ferrítico ABNT 430. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v.3, n.1, p.40-44, 2006.

CHENG, X.; JIANG, Z.; WEI, D.; ZHAO, J.; MONAGHAN, B.; LONGBOTTOM, R. J.; JIANG, L. High temperature oxidation behaviour of ferritic stainless steel SUS 430 in humid air. **Metals and Materials International**, v.21, n.2, p.251-259, 2015.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2008.

CORDEIRO, F. D. M. **Avaliação da influência da temperatura de tratamento térmico de um aço inoxidável AISI 430, laminado a quente e recozido, na dissolução de carbonetos de cromo e no ataque corrosivo à superfície**. 2023. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Programa de Pós-Graduação em Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2023.

COURA, E. V.; CAMISÃO, L.R.; PEREIRA, A. DE SOUZA.; LISBOA, W.; MACHADO, A.

P.; CORDEIRO, F.; ROCHA, S. A.; POMTES, R. C. **Redução do custo da não qualidade do aço ABNT430 devido ao defeito carepa Incrustada**. Aperam South América, Timóteo: 2021, 26p. 2021.

CUNHA, E. C.; FARIA, G. L.; GODEFROID, L. B.; FARIA, G. A. Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Intergranular em Aços Inoxidáveis Aplicados em Chapas Expandidas. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT, Natal – RN, 2016.

FANG, C. Annealing and Precipitation Behavior During Batch Annealing of HSLA Steels, University of Pittsburgh, 2011, p. 147.

GARCÍA, I. C.; GALINDO, A. N.; BELLO, J. F. A.; LEAL, J. M. G.; PEDEMONTE, J. F. B. Characterisation of High Temperature Oxidation Phenomena during AISI 430 Stainless Steel Manufacturing under a Controlled H₂ Atmosphere for Bright Annealing. **Metals**, v.11, p.191-206, 2021.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. RIO DE JANEIRO: LTC, v.1, 1996.

GONÇALVES, K. A. M. B. G. **Influência da Deformação a Frio e Recozimento na Textura Cristalográfica e Propriedades Mecânicas dos Aços Inoxidáveis Duplex uns S31803 e uns S32304**. 2020. 160f. Mestrado (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Programa de Pós-Graduação em Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2015.

GONÇALVES, C. N.; MODENESI, P. J.; ESTEVES, L.; CAMPOS, W. R. da C. Avaliação da Adição de Ti, Nb e (Ti+Nb) na Microestrutura e Susceptibilidade à Sensitização de Aços Inoxidáveis Ferríticos Submetidos à Soldagem TIG. **Soldagem & Inspeção**, v.24, 2019.

HONEYCOMBRE, R. W. K. Steel, microstructure and properties, 2ª. Ed. Edward Arnold, 1981, pp. 244.

JANOSEC. M, SCHINDLER. I, VODÁREK. V, PALÁT. J e RUSZ. P. S. S, “Microstructure

and mechanical properties of cold rolled, annealed HSLA strip steels,” Technical University of Ostrava, Archives of Civil and Mechanical Engineering , vol. 7, n. 2, pp. 29-38, 2007.

GOTTSTEIN, G. **Physical Foundations of Materials Science**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, v.1, 2004.

IORDANOVA, A.; FORCEY, K.S.; HARIZANOVA, R.; GEORGIEV, Y.; SURTCHEV, M. Investigation of structure and composition of surface oxides in a high chromium martensitic steel. **Nuclear Materials**, v.257, n.2, p.126–133, 1998.

KOFSTAD, P. **High Temperature Corrosion**. 2. ed. Elsevier Applied Science Pub, LTD, 1998.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. (ASM International, 2015).

KWON, G-H.; PARK, H.; CHOI, B.; LEE, Y-K.; MOON, K. Influence of Cr Content on the High-Temperature Oxidation Behavior and Mechanism of Low-Alloy Steels. **Materials**, v.16, n.14, p.4964, 2023.

LACOMBE, P.; BAROUX, B.; BERANGER, G. Stainless Steels. *In: Les éditions de Physique*. 1. ed. v.1, p.437–462, 2000.

MACEDO, M. R. de S.; MANFRINATO, M. D. **Têmpera no aço inox AISI 420 e a influência das temperaturas de revenimento na resistência a corrosão**. São Paulo: Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, 2015.

MAGALHÃES, H. R.; GONCALVEZ, C. N.; SANTOS, N. F.dos; CARVALHO, G. M. A. **Avaliação da microestrutura e dureza do aço inoxidável ferrítico AISI 430 e AISI 430Nb tratados termicamente**. Proceedings ABM. São Paulo: Editora Blucher, 2019.

MALLAIAH, G.; KUMAR, A.; REDDY, P. R.; REDDY, G. M. Influence of grain refining elements on mechanical properties of AISI 430 ferritic stainless-steel weldments – Taguchi approach. **Materials & Design**, v.36, p.443–450, 2012.

MANTEL, M. Oxidação de Metais. **Acesita - Seminário Inox 2000**. Roças Novas, MG, 2000.

OGWU, A. A.; DAVIES, T. J. Improving the sensitisation resistance of ferritic stainless steels. **Scripta Materialia**, v.37, n.3, p.259–263, 1997.

OLIVEIRA, A. R. de. Corrosão e tratamento de superfície; Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012. 104p.

OLIVEIRA, R. K.; ANTUNES, B.; ALTOBELLI, R. Estudo do efeito de tratamentos térmicos de recozimento sobre a resistência à corrosão do aço inoxidável ASTM F139. *In*: INTERCORR, 2018, São Paulo, Brasil. **Proceedings**, 2018.

OLIVEIRA, B. F.; TERRA, D. G. S.; TERRONES, L. A. H. Avaliação da camada de óxidos formada a altas temperaturas em aços inoxidáveis utilizados como interconectores para PaCOS. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v.18, n.1, p.1–9, 2013.

PARDINI, A. C. P. **Estudo da oxidação em altas temperaturas dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 430A e AISI 430E a ar**. 2008. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

PINEDO, C. E. **Tratamento térmico e superficiais dos aços**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2021. 326p.

REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara dois SA, v.1, 1982.

SANTOS, R. M.; CARVALHO, E. G. de; FONSECA, G. S. da; PAULA, A. dos S. **Influência das variáveis de processo de recozimento em caixa e laminação de encruamento nas propriedades magnéticas de aço ao carbono laminado a frio**. Anais do Congresso Anual da ABM. São Paulo: Editora Blucher, 2017.

SEDRIKS, A. J. *Corrosion of Stainless Steels*. 2. ed. Wiley, 1996.

SCHMITT, V. M.; PARDAL, J. M.; SOUTO, S.; PONZIO, E. A.; SOUZA, V. M.; KINA, A. Y. Estudo da Influência da Microestrutura na Suscetibilidade à Sensitização do Aço Inoxidável AISI 430 por Polarização Eletroquímica de Reativação Cíclica (PERC). **Revista Virtual de Química**, v.5, p.691-712, 2013.

SENRA-GIRALDO, C. A. **Resistência à Corrosão Intergranular do Aço Inoxidável Ferrítico UNSS S43000: Avaliação por Método de Reativação Eletroquímica, efeito de Tratamento Isotérmico e Mecanismo de Sensitização**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SILVA, A. L. V. da C. E.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 4. ed. São Paulo: Blucher, v.1, 2021.

SILVEIRA, R. M. S. **Caracterização da camada de óxido formada na superfície externa das colunas de fornos de reforma a vapor**. 2017. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

SIQUEIRA, R. P.; RODRIGUES, C. E. M.; SANDIM, H. R. Z.; BALDAN, C. A.; OLIVEIRA, T. R. Recristalização do aço AISI 430 com estrutura colunar de grãos. **Revista Escola de Minas**, v.60, n.1, p.117-122, 2007.

SOUZA, A. O. E.; SILVA, A. E. da; PINHEIRO, I. P. Influência dos tratamentos térmicos de recozimento e desestabilização na precipitação de carbonetos secundários e na dureza de uma liga de ferro fundido branco alto cromo com nióbio. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v.27, n.3, 2022.

SOUZA, S. A. de. **Composição Químicas dos Aços**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, v.1, 2012.

SOUZA, V. M. de; KINA, A. Y.; TAVARES, S. S. M.; PONZIO, E. A.; SCHMITT, V. M.; PARDAL, J. M. Double Loop Electrochemical Potentiodynamic Reactivation Test (DL-EPR) Study of the Influence of Microstructure on the Susceptibility of AISI 430 Stainless Steel to Sensitization. **Revista Virtual de Química**, v.5, n.4, 2013.

SOUZA, V. F. de; ARAUJO, A. J.; SANTOS, J. L. do N; DELLA ROVERE, C. A.; MALAFAIA, A. M. de S. Kinetics Oxidation and Characterization of Cyclically Oxidized Layers at High Temperatures for FeMnSiCrNiCe and FeSiCrNi Alloys. **Materials Research**, v.20, n.2, p.365-373, 2017.

TAVARES, S. S. M.; SOUZA, L. F. G. de; CHUVAS, T. de C.; MACHADO, C. L. da C.; ALMEIDA, B. B. de. Influence of heat treatments on the microstructure and degree of sensitization of base metal and weld of AISI 430 stainless steel. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v.22, n. 1, p.0-0, 2017.

TEÓFILO, R. F.; FERREIRA, M. M. C. Quimiometria II: Planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Química Nova**, v.29, p.338-350, 2006.

ZHAI, M.; LOCQUET, A.; ROQUELET, C.; BOREAN, J-L.; MEILLAND, P.; CITRIN, D. S. Nondestructive Tertiary Mill-Scale Thickness Measurement on Commercial Hot-Rolled Steel Strip: Terahertz Time-of-Flight Tomography. **Steel Research International**, v.94, n.11, 2023.