



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

YARA AMORIM DE FIGUEIREDO

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO ALTO MANGANÊS:
EFEITO DA LAMINAÇÃO A FRIO E TEMPERATURA DO ELETRÓLITO.

FORTALEZA

2024

YARA AMORIM DE FIGUEIREDO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO ALTO MANGANÊS:
EFEITO DA LAMINAÇÃO A FRIO E TEMPERATURA DO ELETRÓLITO.**

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

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.

FORTALEZA

2024

YARA AMORIM DE FIGUEIREDO

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO ALTO MANGANÊS:
EFEITO DA LAMINAÇÃO A FRIO E TEMPERATURA DO ELETRÓLITO.

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

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F493a Figueiredo, Yara Amorim de.
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO ALTO MANGANÊS: EFEITO DA
LAMINAÇÃO A FRIO E TEMPERATURA DO ELETRÓLITO. / Yara Amorim de Figueiredo. – 2024.
79 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Walney Silva Araújo..

1. Corrosão. 2. Aço Alto Manganês . 3. Laminação a Frio. 4. Temperatura do Eletrólito. I. Título.
CDD 620.11

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sabedoria, orientação, força e saúde concedidas ao longo desta jornada acadêmica.

À minha família, especialmente aos meus pais Carlos Augusto e Elizabete, que mesmo à distância se preocuparam com meu bem-estar. Aos meus tios e tias Magali, Carlos Augusto, Fátima e Aníbal Filho, pelo imenso apoio e acolhimento que sempre me proporcionaram. A vocês, meus irmãos, demais familiares e meus gatinhos, Rony e Mimososa.

Ao meu querido Diego, por ter sido um alicerce, e aos amigos do Cariri que estiveram presentes aqui em Fortaleza durante toda essa trajetória, sou grata por todo o carinho e suporte de todos vocês.

Ao meu professor e amigo Hermínio, meu tio Sales e minha amiga Darcinha, que se foram no ano de 2023, grata por terem feito parte da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Walney Silva Araújo, grata pela sua orientação diligente, paciência e dedicação.

Aos professores Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, por fornecer o material que deu origem à minha pesquisa, e ao Dr. Sergio Souto Maior Tavares, agradeço a ambos pela participação na banca avaliadora da dissertação.

Aos amigos que fiz na UFC, em especial a Rafaela. Aos integrantes do LPC, por terem sido ótimos colegas de trabalho, em especial a Henrique e Ana Aline por terem sido tão prestativos.

Aos laboratórios LPC, por todos os ensaios realizados. Ao LACAM, pelo fornecimento de insumos e materiais. À Central Analítica da UFC, pela realização das análises de microscopia eletrônica, ao SENAI Maracanaú pela laminação a frio do material e ao IFCE de Maracanaú pelos ensaios de microdureza.

À Funcap, pelo apoio financeiro por meio da bolsa de auxílio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Por fim, agradeço a todos os professores, funcionários e colegas que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento do meu projeto de dissertação.

“Aquele que habita no esconderijo do Altíssimo, à sombra do Onipotente descansará. Direi do Senhor: Ele é o meu Deus, o meu refúgio, a minha fortaleza, e Nele confiarei.”

Salmos 91

RESUMO

O progresso no desenvolvimento de aços avançados tem se destacado, impulsionado pela crescente necessidade de materiais que sejam simultaneamente leves e apresentem um bom desempenho mecânico e resistência à corrosão. Os aços de alto Manganês (Mn), com uma composição entre 12 - 30%, são ligas de ferro que possuem o efeito TWIP (Twinning Induced Plasticity), conferindo a esses materiais uma combinação única de resistência mecânica e ductilidade. Entretanto, há poucos trabalhos na literatura sobre a resistência à corrosão desse material. Assim, o objetivo desse trabalho foi analisar a influência da laminação a frio na resistência à corrosão da liga Fe-Mn. Combinado a isso, foi estudado a influência do aumento da temperatura do eletrólito na cinética da corrosão. Para realização desse trabalho foi avaliado o comportamento eletroquímico e microestrutural de uma liga experimental de Fe-Mn(26 % wt. Mn) em uma solução eletrolítica de NaCl (0,01M), levando em consideração diferentes reduções de espessura (0, 30, 50 e 70 %) e faixas de temperatura do eletrólito (25, 35 e 45°C). Foram utilizadas técnicas eletroquímicas como o monitoramento de potencial de circuito aberto (OCP), polarização linear potenciodinâmica (PP) e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). Adicionalmente, foram realizados ensaios de perda de massa e análises por microscópio óptico (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de elétrons (EDS), para avaliação da superfície do material. Para caracterização mecânica, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers. Os resultados revelaram que o processo de laminação a frio aumentou gradualmente o número de maclas, devido à tensão aplicada durante o procedimento. O valor da microdureza Vickers foi duplicada com a redução de 30% de espessura, comparada com a amostra como recebida, e seu aumento foi mais pronunciado para o material laminado em 50% e 70%. O principal mecanismo de corrosão observado foi a corrosão generalizada. O efeito da temperatura no eletrólito foi investigado por influenciar na cinética das reações, no qual houve um aumento de densidade de corrente observado nos ensaios de PP. Os testes por EIS indicaram que o acréscimo da temperatura resultou na diminuição da resistência à polarização. Em relação ao efeito da laminação a frio, não foi observada uma mudança significativa na resistência à corrosão, apresentando valores semelhantes em todos os ensaios eletroquímicos e condizentes com os ensaios de perda de massa.

Palavras-Chave: Corrosão; Aço Alto Manganês; Laminação a Frio, Temperatura do Eletrólito.

ABSTRACT

Progress in developing advanced steels has been outstanding, driven by the growing need for lightweight materials with good mechanical performance and corrosion resistance. High manganese (Mn) steels, with a composition of 12 - 30%, are iron alloys with the TWIP (Twinning Induced Plasticity) effect, giving these materials a unique combination of mechanical strength and ductility. However, there are few studies in the literature on the corrosion resistance of this material. Therefore, this study aimed to analyze the influence of cold rolling on the corrosion resistance of the Fe-Mn alloy. In addition, the influence of increasing the electrolyte temperature on corrosion kinetics was studied. In this work, the electrochemical and microstructural behavior of an experimental Fe-Mn alloy (26 % wt. Mn) in an electrolytic NaCl solution (0.01M) was evaluated, taking into account different thickness reductions (0, 30, 50, and 70 %) and electrolyte temperature ranges (25, 35 and 45°C). electrochemical techniques such as open circuit potential (OCP) monitoring, potentiodynamic linear polarization (PP), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) were used. In addition, mass loss tests and analysis by optical microscope (OM), scanning electron microscopy (SEM) and elastic scattering spectroscopy (ESS), were carried out to evaluate the surface of the material. For mechanical characterization, the Vickers microhardness test was carried out. The results showed that the cold rolling process gradually increased the number of maclas due to the stress applied during the procedure. The Vickers microhardness value was doubled with the 30% thickness reduction, compared to the sample as received, and its increase was more pronounced for the material rolled at 50% and 70%. The primary corrosion mechanism observed was generalized corrosion. The effect of temperature in the electrolyte was investigated as it influenced the kinetics of the reactions, in which an increase in current density was observed in the PP tests. The EIS tests indicated that the increase in temperature resulted in decreased polarization resistance. No significant change in corrosion resistance was observed about the effect of cold rolling, showing similar values in all the electrochemical tests and consistent with the mass loss tests.

Keywords: Corrosion; High Manganese Steel; Cold Rolling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alongamento x Limite de resistência à tração para as gerações de AHSS.	19
Figura 2 – Microscopia Óptica de um aço TWIP.	20
Figura 3 – Diagrama de fases do aço Hadfield.	22
Figura 4 – Diagrama de Equilíbrio do Fe-Mn.	23
Figura 5– Diagrama de fases metaestável do sistema Fe-Mn, para ligas resfriadas após aquecimento a 950°C.	23
Figura 6 – Deformação de um metal durante laminação.	24
Figura 7 – Curva de Polarização.	28
Figura 8 – Fluxograma da Metodologia.	34
Figura 9 – Esquema de montagem de célula eletroquímica em um Potenciostato.	35
Figura 10 – Micrografias óticas das ligas 26Mn a) CR – 1000x; b) 30% – 1000x; c) 50% 1000x; d)70% – 1000x. Reagente de ataque – 60% Água destilada + 40% Ácido Nítrico.	39
Figura 11 – Microdureza Vickers do material como recebido 26Mn, 30, 50 e 70% de redução de espessura pelo processo de laminação a frio e lixado por lixas d’água com granulometrias 220, 320, 400.	41
Figura 12 – Monitoramento de Circuito Aberto (OCP) do como recebido (CR), 30%, 50% e 70% de redução por Laminação a Frio, em diferentes temperaturas de aquecimento do eletrólito (25°C, 35°C e 45°C).	43
Figura 13 – Curvas de polarização linear da liga 26% de Mn como recebida, e laminada a frio com redução de espessura de 30, 50, 70% comparadas com diferentes temperaturas.	44
Figura 14 – Curva de polarização linear portenciodinêmica do CR, 30%, 50% e 70% em diferentes temperaturas (25°C, 35°C e 45°C).	45
Figura 15 – Micrografias óticas da liga de alto Mn – CR: a)25°C pré-polarização; b)25°C pós-polarização; c) 35°C pré-polarização; d) 35°C pós-polarização; e) 45°C pré-polarização; e f) 45°C pós-polarização. Todas as imagens com aumento de 50x.	48

Figura 16 – Micrografias ópticas da liga de alto Mn – 30% de redução de laminação: a)25°C pré-polarização; b)25°C pós-polarização; c) 35°C pré-polarização; d) 35°C pós-polarização; e) 45°C pré-polarização; e f) 45°C pós-polarização. Todas as imagens com aumento de 50x.	49
Figura 17 – Micrografias ópticas da liga de alto Mn – 50% de redução de laminação: a)25°C pré-polarização; b)25°C pós-polarização; c) 35°C pré-polarização; d) 35°C pós-polarização; e) 45°C pré-polarização; e f) 45°C pós-polarização. Todas as imagens com aumento de 50x.	50
Figura 18 – Micrografias ópticas da liga de alto Mn – 70% de redução de laminação: a)25°C pré-polarização; b)25°C pós-polarização; c) 35°C pré-polarização; d) 35°C pós-polarização; e) 45°C pré-polarização; e f) 45°C pós-polarização. Todas as imagens com aumento de 50x.	51
Figura 19 – Micrografias eletrônicas de varredura da liga alto Mn CR: a) e b) 25°C; c) e d) 45°C; após polarização.	52
Figura 20 – Micrografias eletrônicas de varredura da liga alto Mn laminado a frio 50%: a) e b) 25°C; c) e d) 45°C; após polarização.	53
Figura 21 – Micrografias eletrônicas de varredura da liga alto Mn laminado a frio 70%: a) e b) 25°C; c) e d) 45°C; após polarização.	54
Figura 22 – Gráfico de Bode dos espectros de impedância (log F vs log Z e ângulo de -Fase) para como recebido em diferentes temperaturas (25°C, 35°C e 45°C).	55
Figura 23 – Gráfico de Bode do espectro de impedância (log F vs log Z e ângulo de -Fase) para 30% de redução por laminação a frio em diferentes temperaturas (25°C, 35°C e 45°C).	55
Figura 24 – Gráfico de Bode do espectro de impedância (log F vs log Z e ângulo de -Fase) para 50% de redução por laminação a frio em diferentes temperaturas (25°C, 35°C e 45°C).	56
Figura 25 – Gráfico de Bode do espectro de impedância (log F vs log Z e ângulo de -Fase) para 70% de redução por laminação a frio em diferentes temperaturas (25°C, 35°C e 45°C).	56
Figura 26 – Gráficos de Bode do espectro de impedância (log F vs log Z e ângulo de -Fase) para 25°C, 35°C e 45°C em diferentes espessuras por laminação a frio.	57
Figura 27 – Média e desvio padrão da taxa de corrosão do Aço alto Mn obtida por perda de massa.	58

Figura 28 – a) Imagem da superfície do material como recebido a 25°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS.	61
Figura 29 – a) Imagem da superfície do material como recebido a 45°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS.	63
Figura 30 – a) Imagem da superfície do material com 50% de redução por laminação a frio a 25°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS.	65
Figura 31 – a) Imagem da superfície do material com 50% de redução por laminação a frio a 45°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS.	67
Figura 32 – a) Imagem da superfície do material com 70% de redução por laminação a frio a 25°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS.	69
Figura 33 – a) Imagem da superfície do material com 70% de redução por laminação a frio a 45°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composições do Aço de Alto Manganês como recebido (CR).	33
Tabela 2 – Valores de microdureza Vickers obtidos através do processo de tratamento superficial por lixamento com lixas de granulometrias 220, 320, 400 e 600 para o material 26Mn como recebido e laminado a frio em diferentes reduções de espessuras.....	40
Tabela 3 – Média dos valores de Potencial de Circuito Aberto obtidos para a liga como recebida (CR) e laminadas 30, 50 e 70% de redução em solução 0,01 M de NaCl a diferentes valores de temperatura.	42
Tabela 4 – Média dos valores de Potencial de Corrosão - Ecorr obtidos para a liga como recebida (CR) e laminadas 30, 50 e 70% de redução em solução 0,01 M de NaCl a diferentes valores de temperatura.	46
Tabela 5 – Média dos valores da Corrente de Corrosão - Icorr obtidos para a liga como recebida (CR) e laminadas 30, 50 e 70% de redução em solução 0,01 M de NaCl a diferentes valores de temperatura.	47
Tabela 6 – Média dos valores da resistência à polarização (RP) obtidos através do módulo de impedância da frequência de 6mHz, para a liga como recebida - CR e laminadas 30, 50 e 70% de redução em solução 0,01 M de NaCl a diferentes valores de temperatura.	58
Tabela 7 – Elementos presentes após análise de EDS do material como recebido (0% de redução de espessura por laminação a frio) a 25°C.	62
Tabela 8 – Elementos presentes após análise de EDS do material como recebido (0% de redução de espessura por laminação a frio) a 45°C.	64
Tabela 9 – Elementos presentes após análise de EDS do material com 50% de redução de espessura por laminação a frio a 25°C.	66
Tabela 10 – Elementos presentes após análise de EDS do material com 50% de redução de espessura por laminação a frio a 45°C.	68
Tabela 11 – Elementos presentes após análise de EDS do material com 70% de redução de espessura por laminação a frio a 25°C.	70

Tabela 12 – Elementos presentes após análise de EDS do material com 70% de redução de espessura por laminação a frio a 45°C.	72
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Estudos sobre a resistência à corrosão de aços com alto teor de manganês.	32
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivos gerais.....	17
2.2. Objetivos específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Aço e suas ligas	18
3.2. Aços avançados de alta resistência	18
3.3. Aço de alto manganês	21
3.4. Processamentos mecânicos.....	24
3.5. Corrosão	25
3.6. Técnicas eletroquímicas aplicadas à corrosão.....	27
3.7. Corrosão em aços de alto manganês	29
4. MATERIAIS.....	33
4.1. Processo de conformação a frio	33
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	34
5.1. Preparação das amostras	34
5.2. Técnicas de análise eletroquímica	35
5.3. Caracterização microestrutural e mecânica.....	36
5.4. Perda de massa.....	37
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6.1. Microestrutura	39
6.2. Microdureza vickers e a influência da preparação da superfície metálica	40
6.3. Monitoramento do potencial de circuito aberto.....	41
6.4. Polarização potenciodinâmica linear	43
6.5. Espectroscopia de impedância eletroquímica	54
6.6. Perda de massa.....	58
7. CONCLUSÃO	73
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	75

1. INTRODUÇÃO

O setor industrial busca componentes que demonstrem resistência à corrosão, estampabilidade, leveza e alta resistência mecânica. São materiais que se caracterizam pelos diferentes mecanismos de deformação, como a de transformação induzida por plasticidade e por maclas mecânicas, conferindo propriedades únicas a esse material. Os aços avançados de alta resistência, especificamente, os aços de plasticidade induzida por maclação (TWIP), são materiais que possuem um alto teor de manganês (12-30%) e apresentam propriedades que ganham destaque pela combinação de resistência mecânica e ductilidade (FARJADO et al., 2009).

Essas ligas de manganês exibem uma estrutura austenítica, revelando-se economicamente viáveis para o Brasil, que figura entre os maiores produtores mundiais do elemento manganês, com suas principais reservas localizadas em Minas Gerais e no Pará (DNPM, 2018).

O aço de alto manganês é um material utilizado em diversos setores, como o de criogênia, que produz peças capazes de suportar baixas temperaturas, situando-se entre -173 e -123 °C. Isso se deve à sua aplicação no armazenamento e transporte de líquidos e insumos, além de ser empregado em peças destinadas a aplicações espaciais e biológicas. Presente também nos setores petrolífero, siderúrgico e de mineração, por meio de tratamentos térmicos e mecânicos, as características desse tipo de aço podem ser aprimoradas e ampliadas (LIMA, 2009; DAVID, 2003).

São amplamente empregados em componentes automotivos devido à sua baixa densidade, alta ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. Esta escolha se justifica não apenas pela eficiência dessas propriedades, mas também pela capacidade de reduzir as emissões de gases carbônicos prejudiciais ao meio ambiente, devido ao peso reduzido das peças fabricadas. Adicionalmente, em comparação com outros materiais, destaca-se pela sua viabilidade econômica, já que apresenta um custo aceitável na sua fabricação. (NETO, FUKUGAUCHI e DOS SANTOS PEREIRA, 2020).

O estudo desse aço tornou-se de suma importância para atender às demandas do mercado. Com o objetivo de aprimorar o desempenho do material diante do desafio da corrosão, foram aplicados tratamentos mecânicos. Entre eles, destaca-se a laminação a frio, um método de conformação mecânica que promove alterações na microestrutura do aço por meio de deformação plástica em temperatura ambiente. No caso do aço de alto de manganês, essa

modificação resulta em um aumento na resistência ao escoamento do material, favorecendo ainda mais sua resistência mecânica (YANUSHKEVICH et al., 2016).

Esse trabalho buscou compreender a resistência à corrosão de uma liga experimental de aço com alto teor de manganês (26 % wt. Mn), laminada em diferentes reduções de espessura, tendo como objetivo avaliar o comportamento eletroquímico e microestrutural nas seguintes faixas de temperatura do eletrólito: 25, 35 e 45°C.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos gerais

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento eletroquímico da liga de Fe-26Mn para diferentes reduções de espessuras, deformadas a frio, em solução de NaCl (0,01M).

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a resistência à corrosão da liga de alto teor de manganês como recebida (CR) e laminada a frio com as seguintes reduções: 30%, 50% e 70%, através das técnicas de eletroquímica como Monitoramento de Potencial de Circuito Aberto (OCP), Polarização Linear Potenciodinâmica (PP) e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS).
- Avaliar a influência da temperatura (25, 35 e 45°C) do eletrólito na resistência à corrosão.
- Caracterizar por Microscopia Óptica (MO) e Microscopia eletrônica de varredura (MEV) as superfícies das amostras antes e após o processo de corrosão para obter informações da microestrutura e morfologia dos produtos de corrosão.
- Analisar o efeito da deformação a frio e das lixas d'água no aço alto Mn na propriedade de Microdureza Vickers.
- Realizar teste de perda de massa por imersão em 0,01M de NaCl e com variação de temperatura da solução em 25, 35 e 45°C.
- Estimar a taxa de corrosão para o metal como recebido e laminados a frio.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aço e suas ligas

Os aços podem ser classificados com base na composição química, microestrutura e nas propriedades do aço ou da liga. No que se refere a microestrutura, aspectos como as quantidades de fases presentes (ferrita, austenita, martensita, etc) podem ser utilizados para especificação do material. Entre as propriedades, têm-se a resistência à corrosão, propriedades físicas, resistência ao impacto, resistência mecânica, entre outras. As adições de elementos de ligas podem influenciar nas características do material. Por exemplo, o cromo aumenta a resistência à corrosão ~~e à oxidação~~, além de melhorar a resistência a altas temperaturas e ao desgaste. Já o silício atua como desoxidante e também apresenta resistência à oxidação. O manganês, por sua vez, é um elemento, que em baixas quantidades, aumenta a temperabilidade (SILVA e MEI, 2006).

Os aços podem ser classificados em diferentes categorias, sendo uma delas os aços estruturais. Nesta classe, estão incluídos os aços laminados, que são utilizados em aplicações estruturais e apresentam um menor custo de produção. Para aplicações mais exigentes, são empregados os aços de alta resistência e baixa liga (*High Strength Low Alloy- HSLA*), pois oferecem melhorias na resistência à tenacidade e soldabilidade. Além disso, esses materiais possuem um controle preciso da composição e do tamanho de grão, resultando na obtenção de aços de grãos finos (SILVA e MEI, 2006).

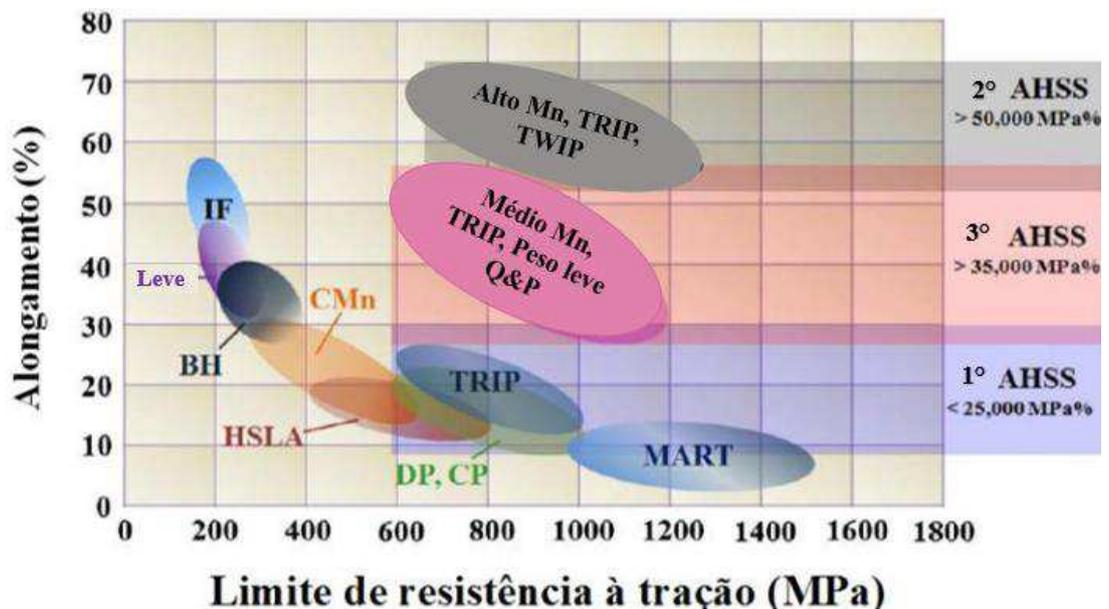
Os aços podem ser classificados também como aços avançados de alta resistência (*Advanced High Strength Steels- AHSS*) com base em sua alta resistência e ductilidade. Essa classificação engloba o aço de alto manganês, que apresenta uma combinação de alta resistência (< 700MPa) e boa ductilidade (< 50%) (LEE e HAN, 2015).

3.2. Aços avançados de alta resistência

Os AHSS têm se destacado devido à combinação de alta resistência mecânica e boa ductilidade. Uma de suas principais aplicações encontra-se na indústria automobilística, pois apresentam características que proporcionam uma redução significativa no peso dos materiais. Por conferir estruturas mais leves, tornou-se uma alternativa favorável aos desafios ambientais, uma vez que seu uso contribui para a diminuição das emissões de gases que contribuem prejudiciais à atmosfera (BHADESHIA e HONEYCOMBE, 2006).

Na Figura 1, é apresentado o alongamento total em função do limite de resistência à tração. Com base nessa imagem, é possível identificar os diferentes tipos de aços AHSS, que podem ser classificados em três gerações. Na primeira geração, encontram-se os aços DP (*Dual Phase* - duas fases), CP (*Complex Phase* - aços com fase complexa), os aços TRIP (*Transformation Induced Plasticity* - transformação de fase induzida por deformação plástica) e os MART (*Martensitic* - aços martensíticos). Na segunda geração, tem o aço TWIP (*Twinning Induced Plasticity* - plasticidade induzida por maclação) e o TRIP com alto teor de manganês. Por fim, na terceira geração, está o aço TRIP com médio teor de manganês (BHADESHIA e HONEYCOMBE, 2006).

Figura 1 - Alongamento x Limite de resistência à tração para as gerações de AHSS.



Fonte: Adaptado de LEE e HAN, 2015.

Entre os aços apresentados na Figura 1, merecem destaque os pertencentes à segunda geração, em particular o aço TWIP. Este tipo de aço possui resistência superior a 700 MPa e é um efeito observado em aços de alto teor de manganês, despertando grande interesse indústria. Além de possuir baixa densidade, o aço TWIP apresenta excelentes propriedades mecânicas, boa soldabilidade, tenacidade considerável e resistência à fadiga (SILVA e MEI, 2006).

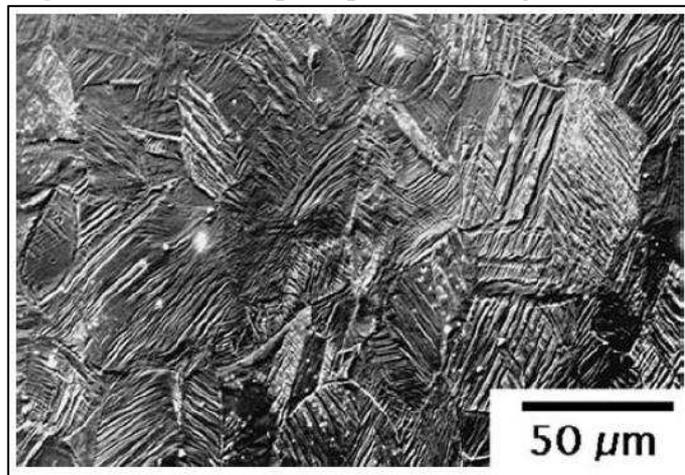
3.2.1. Aço TWIP e energia de falha de empilhamento (EFE)

O contorno de grão é uma imperfeição interfacial com alta energia, devido à alta densidade de defeitos cristalinos. Ele atua como um obstáculo ao deslizamento de discordâncias, que são responsáveis por distorções na rede cristalina do material. Ao dificultar

a movimentação dessas discordâncias, ocorre um aumento na resistência à deformação plástica do material. No caso do aço TWIP, ocorre uma alta formação de maclas no interior dos grãos, o que contribui para que os contornos de grão impeçam o movimento das discordâncias. (CALLISTER, 2012; LIMA, 2018).

Os aços TWIP são a classe de materiais que se caracterizam pelo efeito da maclação mecânica para alcançar propriedades específicas, como a alta ductilidade. Nesse tipo de aço, a estrutura cristalina é preservada durante o processo de deformação plástica, mas a região de maclação é reorientada. A deformação por maclação, característica desse material, provoca o deslocamento dos átomos e contribui para a formação de bandas cristalinas dentro do grão, por meio de simetria espelhada. Os TWIP possuem uma estrutura austenítica CFC (cúbica de face centrada), com uma orientação de maclação de plano (111) e de direção [112] (LIMA, 2018; MEYERS, 2009). Na Figura 2, é possível ser observar maclas em um aço TWIP após deformação mecânica.

Figura 2 - Microscopia Óptica de um aço TWIP



Fonte: Adaptado de BHADESHIA e HONEYCOMBE, 2006.

Outra imperfeição interfacial encontrada nos aços TWIP é a falha de empilhamento, que é comum para materiais com estrutura CFC e ocorre quando há falha na sequência de empilhamento dos planos compactos. A energia de falha de empilhamento (EFE) é o parâmetro para medir essas falhas. Em metais com estrutura CFC, o valor de EFE está relacionado ao mecanismo de maclação, quanto maior o valor de EFE, maior é a tensão necessária para ocorrer a deformação por macla (LIMA, 2018; MEYERS, 2009). Aços austeníticos de alto Mn de estrutura CFC que apresentam um EFE menor que 40 mJ/m a formação de maclas mecânicas é favorecida durante a deformação plástica à temperatura ambiente (LIMA et al., 2022).

3.3. Aço de alto manganês

Os elementos de liga exercem efeitos específicos nos aços, e a partir de uma concentração 1% de manganês, já podem ser observadas características especiais. O manganês é um elemento que estabiliza a fase austenítica em temperatura ambiente. Em concentrações mais elevadas, ele elimina toda a fase ferrita e restringe a transformação martensítica, favorecendo o mecanismo de maclação (SILVA e MEI, 2006; LIMA, 2018).

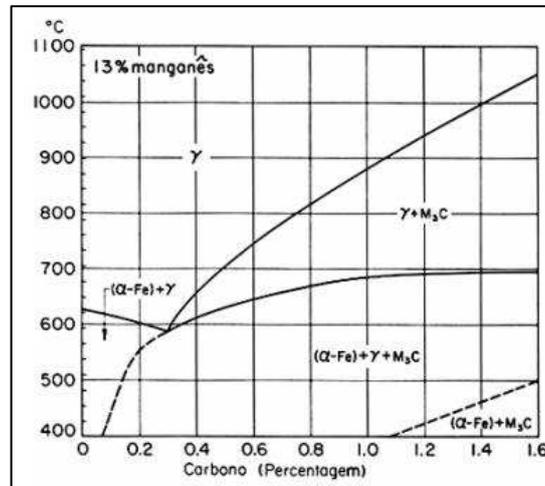
Uma função adicional do manganês é o controle da energia de falha de empilhamento. Em teores de Mn com percentuais entre 10-16%, observa-se uma diminuição do EFE, enquanto em teores de Mn entre 16-33% a EFE aumenta (COOMAN, 2018). Quando o material é submetido a tensão, como ocorre em processos de conformação a frio, o nível do esforço mecânico desempenha um papel crucial na ativação do mecanismo de deformação por maclação (GRASSEL, 2000).

Pode ser citadas algumas outras características, como: o aumento porcentagem em peso de uma liga de Mn (acima de 17%) que pode dificultar a produção e soldabilidade e resultar no aumento do custo do material. Além disso, o aumento do teor de manganês pode reduzir o ferromagnetismo do aço TWIP, aumentar a resistência ao impacto do material e ductilidade do material, bem como diminuir a temperatura dúctil-frágil para baixas temperaturas. (LEE e HAN, 2015; FROMMEYER, 2003).

Aços de Alto Manganês (Mn) são ligas de ferro com um teor de Mn superior a 12%. Sir Robert Hadfield deu início aos estudos envolvendo aços austeníticos de alto teor de manganês e, por meio de análises da microestrutura, observou-se que o teor de Mn, juntamente com o tratamento térmico (temperatura acima de 500°C), resultava em microestruturas totalmente austeníticas. Os aços Hadfield foram os primeiros aços a apresentar alto teor de manganês, contendo aproximadamente 1,2% de carbono e 12% de manganês. Esses materiais possuíam características como baixa resistência, alta tenacidade e boa ductilidade. (BOUAZIZ et al., 2013; LIMA, 2009).

A Figura 3 exibe o diagrama de fases para um aço Hadfield contendo 13% de manganês, onde pode-se observar a presença de uma fase totalmente austenítica em torno de 590 °C.

Figura 3 - Diagrama de fases do aço Hadfield.



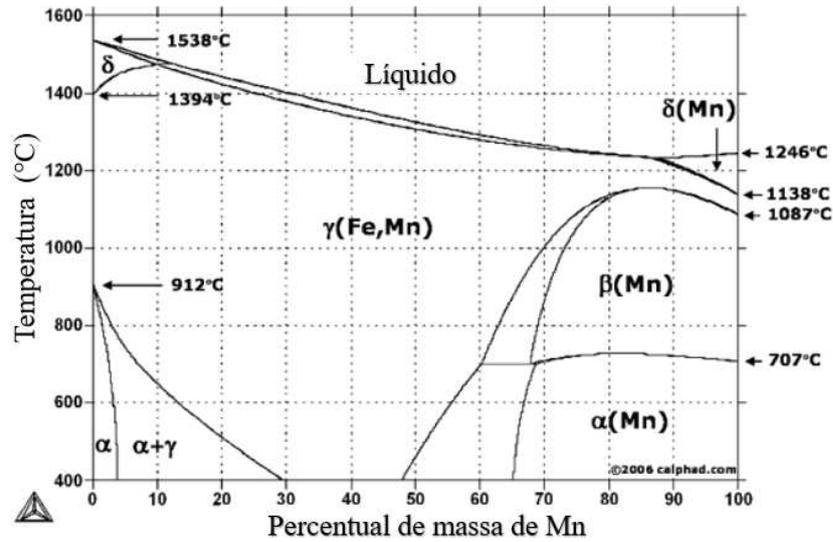
Fonte: ASM Handbook

Ao longo do tempo, foram desenvolvidos tratamentos térmicos e mecânicos para aprimorar o desempenho desse material. Nos aços Hadfield, os tratamentos térmicos são realizados para solubilizar e dissolver os carbonetos presentes no material fundido, pois esses precipitados podem tornar o material mais frágil, especialmente se estiverem presentes em regiões entre os grãos. Para evitar falhas no material, a solubilização é feita em temperaturas em torno de 1150 °C, o que possibilita a dissolução dos carbonetos e torna a microestrutura homogênea. (LIMA, 2009; MAZANCOVÁ, 2007; SMITH, 2004).

3.3.1. Diagrama de Fe-Mn

Uma forma eficaz de compreender o comportamento do manganês no aço é por meio do seu diagrama de fases. Na Figura 4, é apresentado o diagrama de equilíbrio para o sistema Fe-Mn, no qual pode ser observado uma ampla região correspondente a fase austenítica γ (Fe, Mn) de estrutura CFC. O elemento Mn é considerado um estabilizador da fase austenítica, uma vez que sua presença aumenta este campo, enquanto diminui a fase ferrítica-delta (δ) e a fase ferrítica-alfa (α) em diferentes temperaturas (SILVA e MEI, 2006).

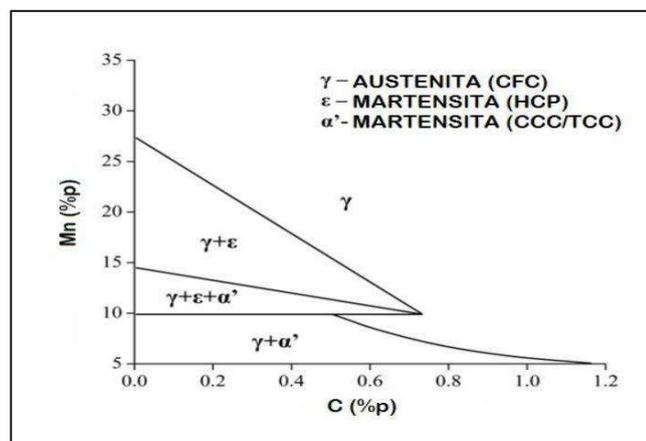
Figura 4 – Diagrama de Equilíbrio do Fe-Mn



Fonte: Adaptado de Calphad (2015).

Há dois produtos martensíticos que podem ser formados no sistema Fe-Mn-C como resultado de resfriamento a partir de um estado austenítico. O diagrama criado por Schumann, 1972, apresentado na Figura 5, mostra a formação das fases metastáveis Martensita- α' , que pode ser cúbica de corpo centrado (CCC) ou tetragonal de corpo centrado (TCC), dependendo do teor de C, e Martensita- ε , hexagonal compacta (HC). Neste diagrama está presente também a fase Austenita (γ -CFC), porém não é um diagrama em equilíbrio. Como os elementos Carbono e o Manganês são os estabilizadores da austenita, o seu aumento faz com que a microestrutura varie de (Martensita- α' + Austenita- γ) para austenítica.

Figura 5 – Diagrama de fases metaestável do sistema Fe-Mn, para ligas resfriadas após aquecimento a 950°C.



Fonte: Adaptado Schumann (1972).

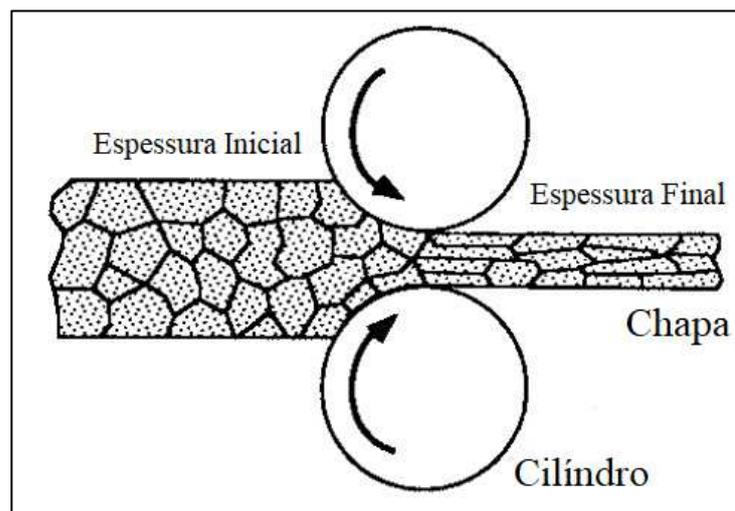
3.4. Processamentos mecânicos

Alguns dos principais processos de fabricação de um material metálico são conformação, fundição, usinagem, metalurgia do pó e tratamentos térmicos. O processo de conformação altera a forma da peça metálica por meio de deformação plástica, a quente ou a frio. Destacando-se nessa operação a laminação, o forjamento, a extrusão e a trefilação (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

3.4.1. Laminação

A laminação, Figura 6, é um processo no qual uma peça é submetida à passagem entre dois rolos que giram em sentidos, estando a uma distância inferior à espessura do material. Durante essa passagem, o material sofre atrito mecânico de compressão entre os rolos, resultando uma espessura reduzida e um aumento na largura (SILVA e MEI, 2006).

Figura 6 - Deformação de um metal durante laminação.



Fonte: Adaptado de DOWLING, 1993.

A laminação pode ser realizada tanto a quente quanto a frio. No caso da laminação a quente, o processo ocorre em temperaturas acima da temperatura de recristalização em que o metal apresenta mais ductilidade.

Durante essa conformação, é necessário aplicar lubrificação constante para reduzir o atrito. Por outro lado, a laminação a frio geralmente ocorre após pré-conformação a quente e provoca diversos efeitos ao material, (CALLISTER e RETHWISCH, 2012; SILVA e MEI, 2006): aumento na resistência mecânica por encruamento, diminuição da ductilidade, qualidade superficial do produto e produção econômica para produtos de pequenas espessuras.

A laminação a frio é um método utilizado para aumentar a resistência ao escoamento de aços estruturais, pois provoca mudanças na microestrutura. Quando combinado com um processo recuperação por recozimento, resulta em propriedades atrativas de resistência ao escoamento e plasticidade em aços laminados de alto Mn (YANUSHKEVICH et al., 2016).

Peguet, Malki e Baroux (2007) investigaram o efeito da laminação a frio na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis AISI 304 SS e AISI 430, com o objetivo de analisar os estágios de corrosão localizada, conhecidos como pite, em comparação com o processo de deformação por tração. Foi observado que as discordâncias resultantes do trabalho a frio afetam a sensibilidade à corrosão. A capacidade de repassivação diminui com o aumento da taxa de trabalho a frio, resultando em uma maior densidade de pite.

Barbucci *et al.* (2001) estudaram o aço inoxidável AISI 301 SS para analisar a capacidade desse material de manter boas propriedades após processos de trabalho a frio. Durante a laminação, foi identificado um aumento na suscetibilidade à corrosão decorrente desse trabalho.

Luo *et al.* (2017) realizaram um estudo que demonstrou o efeito prejudicial da deformação a frio na resistência à corrosão por pite dos aços inoxidáveis duplex UNS S31803. Especificamente, a deformação a frio intensificou eventos de pitting metaestáveis em uma solução saturada de Ca(OH)_2 contendo 3,5% de NaCl em peso.

MA *et al.* (2020) investigaram o efeito da laminação a frio na resistência à corrosão da liga de tântalo Ta-4%W em solução de ácido sulfúrico. A redução de 70% e 90% na espessura aumentou a resistência à corrosão, pela formação de textura, enquanto reduções de 10% a 50% foram prejudiciais devido aos deslocamentos durante a laminação.

Existem divergências nos estudos sobre o efeito da laminação a frio nas propriedades de corrosão de ligas e aços. Portanto, é crucial expandir essa investigação para uma ampla gama de materiais, incluindo o aço de alto manganês.

3.5. Corrosão

O estudo de corrosão é de fundamental importância, pois é um fenômeno que precisa ser mitigado em uma ampla gama de materiais, incluindo componentes automotivos e aeronáuticos, sistemas de tubulações, usinas, peças industriais em geral e materiais de construção. Em muitos casos, esse processo corrosivo pode ter um impacto significativo na

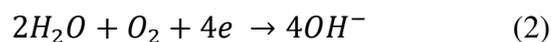
durabilidade e no desempenho desejado, comprometendo estruturas e materiais e acarretando prejuízos econômicas (JONES, 1992).

A corrosão pode ser definida como a transformação de um material devido à interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra. No caso dos materiais metálicos, essa interação resulta na formação de íons metálicos (PANOSSIAN, 1993).

As principais variáveis que influenciam no processo corrosivo, são o material metálico, o meio corrosivo e condições operacionais. O material metálico exerce influência por meio do seu potencial de redução, que está relacionado com a capacidade de produção de elétrons para redução. Isso está diretamente ligado à composição, às impurezas presentes e aos tratamentos térmicos ou mecânicos que o material passou. O meio pode influenciar quando se trata de um ambiente específico para ocorrência de corrosão em um determinado material. Por fim, condições operacionais também podem desempenhar um papel importante, quando há a presença de esforços mecânicos que causam fadiga ao material, resultando no surgimento de fissuras (GENTIL, 2011).

A corrosão metálica envolve a transferência de energia durante o processo. É considerada espontânea quando a reação entre metal e o meio libera energia, enquanto é classificada como não-espontânea quando requer de um fornecimento de energia (PANOSSIAN, 1993).

As reações que desencadeiam o mecanismo de corrosão eletroquímica, envolvendo a geração e transferência de elétrons entre diferentes regiões, são conhecidas como reação de oxirredução, em (1) temos a reação iônica geral de oxidação em que M é um metal qualquer. E a reação de redução em (2) temos a redução da água com oxigênio.



Alguns ambientes nos quais o material se encontra podem exercer influência no processo corrosivo, e um dos fatores determinantes é a temperatura. De acordo com a equação de Arrhenius, representada pela Equação 3, que descreve a cinética das reações eletroquímicas expressa pela densidade de corrente, observa-se que a velocidade está diretamente proporcional à temperatura T , conforme expresso por:

$$i = B \exp \frac{-\Delta G^*}{RT} \quad (3)$$

Sendo que B é uma constante e R é a constante universal dos gases ($R = 8,31$ J/mol.K) e ΔG^* é a energia de ativação, que é a energia que as espécies reagentes necessitam para que a reação se processe (WOLYNEC, 2003).

3.6. Técnicas eletroquímicas aplicadas à corrosão

As técnicas eletroquímicas desempenham um papel fundamental no estudo e na compreensão dos fenômenos que ocorrem na interface entre o eletrodo e o eletrólito. Dentre as técnicas disponíveis, destacam-se três em particular: Monitoramento de Circuito Aberto, Polarização Linear Potênciodinâmica e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica. Essas técnicas fornecem informações valiosas sobre o comportamento eletroquímico do sistema em análise.

3.6.1. Monitoramento do potencial de circuito aberto

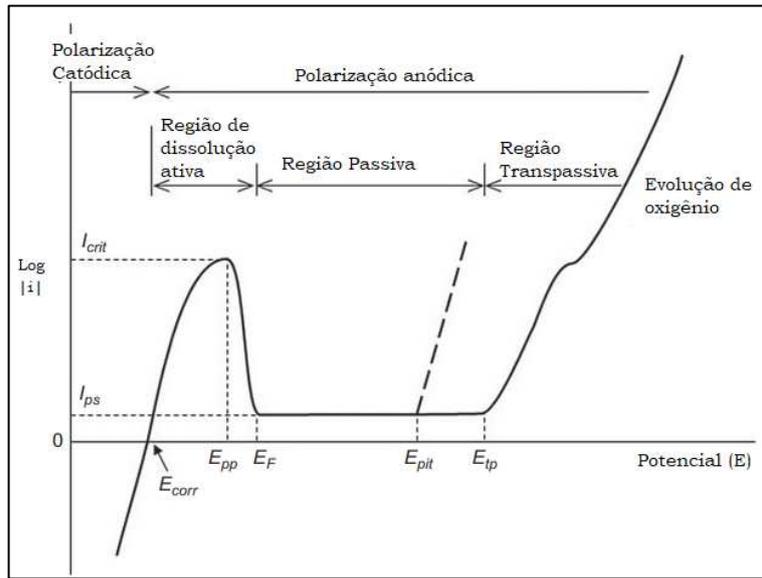
O Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto (OCP) é uma técnica que indica termodinamicamente o comportamento do eletrodo em relação à corrosão eletroquímica, mas não fornece informações quantitativas sobre a taxa de corrosão. É utilizada como um ensaio preliminar antes dos demais que serão apresentados, a fim de verificar o tempo de estabilização do potencial no sistema. Através dessa análise, é possível obter informações qualitativas sobre a cinética das reações que ocorrem no eletrodo de trabalho (XIA, 2022, JIMENÉZ et al., 2009).

No OCP, a taxa de corrosão anódica e catódica estão em equilíbrio. Ao monitorar o período de imersão, podem ser observados valores positivos ou negativos no sistema, indicando possíveis mudanças nas superfícies do material (XIA, 2022, JIMENÉZ et al., 2009).

3.6.2. Polarização potênciodinâmica linear

Um material sofre polarização quando há a imposição de um potencial externo que altera as condições de equilíbrio que caracterizam a reação do sistema. Tal mudança altera a velocidade da reação de oxirredução, conhecida como densidade de corrente (i). As curvas de polarização representam graficamente o potencial do eletrodo (E) em função da densidade de corrente $\log |i|$. Através do procedimento de polarização é possível encontrar as seguintes regiões distintas: anódica e catódica. A região anódica se subdivide em três regiões: ativa, passiva e transpassiva (PANOSSIAN, 1993). A Figura 7 mostra essa divisão.

Figura 7 - Curva de Polarização



Fonte: Adaptado de Hiromoto (2010)

À medida que o potencial aumenta em direção ao potencial de corrosão E_{corr} , ocorre uma transição para a densidade de corrente crítica I_{crit} , na qual o material encontra-se já na região anódica caracterizada pela dissolução anódica do metal. Em seguida, a densidade de corrente diminui para um valor passivo I_{ps} , na região passiva. Em alguns materiais, nessa região, podem se formar filmes passivos aderentes à superfície que protegem o material contra a corrosão. Aumentando o potencial até atingir o potencial por pite (E_{pit}), ocorre um aumento na densidade de corrente, e o material entra na região transpassiva, na qual a camada passiva se desestabiliza e a corrosão por pite e dissolução de oxigênio são iniciadas. Por meio das curvas de polarização, é possível determinar o valor do potencial de corrosão e calcular a taxa de corrosão (HIROMOTO, 2010; WOLYNEC, 2003).

A obtenção dos valores de corrente de corrosão i_{corr} é comumente realizada por meio do método de Tafel. Através da equação geral da cinética de eletrodo, a relação entre o sobrepotencial η e a corrente i é dado pela equação de Butler-Volmer (Equação 4).

$$i = i_{corr} * (e^{2,303 \frac{\eta}{Ba}} - e^{-2,303 \frac{\eta}{Bc}}) \quad (4)$$

Onde i_{corr} é a densidade de corrente de corrosão; Ba e Bc são os coeficientes angulares das retas de Tafel do ramo anódico e do ramo catódico, respectivamente, também conhecidos como declives de Tafel. Simplificando a equação de Butler-Volmer resulta nas equações de Tafel anódica e catódica (Equações 5 e 6). Essas equações estabelecem uma relação linear entre o sobrepotencial e o logaritmo da corrente. Fazendo a extrapolação do

sobrepotencial (η) para zero, é possível obter o valor da corrente de corrosão (WOLYNEC, 2003). Esse procedimento só é válido para os processos controlados por ativação.

$$\eta = Ba * \log \left(\frac{i}{i_{corr}} \right) \quad (5)$$

$$\eta = -Bc * \log \left(\frac{i}{i_{corr}} \right) \quad (6)$$

3.6.3. Espectroscopia de impedância eletroquímica

A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (*Electrochemical Impedance Spectroscopy* - EIS) é uma técnica que permite obter informações sobre a interface eletrodo/solução, através da aplicação de um potencial alternado com baixa amplitude e ampla faixa de frequência, variando de 1 mHz a 1MHz. (HIROMOTO, 2019; CARVALHO, ANDRADE e BUENO, 2006)

Esse método é caracterizado por promover baixa perturbação ao sistema, o que possibilita estudar a taxa de corrosão em sistemas de baixa condutividade. Além disso a EIS também é utilizada para determinar a resistência à polarização e a capacitância da dupla camada eletrônica (WOLYNEC, 2003).

A impedância de um sistema pode ser descrita através da relação expressa pela Equação (7) que é dividida em uma parte real (Z_r) e uma parte imaginária (Z_i). Nos ensaios eletroquímicos, é possível obter um gráfico que representa Z_r em função de Z_i . A partir desse gráfico, é possível extrair informações mencionadas anteriormente (WOLYNEC, 2003).

$$Z = Z_r + jZ_i \quad (7)$$

3.7. Corrosão em aços de alto manganês

Quando se trata de aços com alto teor de manganês, diversos estudos têm se dedicado à análise de sua resistência à corrosão. Um exemplo é o estudo realizado por Fajardo *et al.*, 2019, que investigaram a resistência à corrosão de aços austeníticos TWIP (Fe-Mn-3Al-3Si). Nesse estudo foram variados os teores de manganês na faixa de 21 a 28% em peso, visando compreender o comportamento desses materiais em relação à corrosão. No referido trabalho, foram utilizados testes eletroquímicos específicos na solução desaeada de 0,1 NaCl. Dentre as técnicas empregadas, destaca-se as análises de Polarização Potenciodinâmica Cíclica, Espectroscopia e Curva de Impedância Eletroquímica (EIS) e Espectroscopia de Fotoelétrons de Raios-X (XPS).

Os resultados de EIS indicaram que os aumentos de Mn apresentaram resistência de polarização mais baixa, indicando menor resistência à corrosão. Os espectros de XPS mostraram o aumento de óxido de Mn na camada externa com o aumento do seu teor, houve diminuição de espécies oxidadas de Fe e ausência no aumento de óxidos de Al. Concluíram que o aumento de Mn na liga prejudicou sua resistência à corrosão.

Koyama et al. (2017) conduziram um estudo sobre ligas de alta resistência, com foco no aço de alto manganês, para aplicação em infraestruturas. Com o objetivo de otimizar o uso desse material, foi realizada uma análise aprofundada da sua fragilização por hidrogênio, uma vez que essas ligas são mais suscetíveis a esse fenômeno quando expostas a alta densidade de corrente e deformação por estampagem profunda.

O estudo abrangeu uma revisão dos principais fatores que contribuem para esse tipo de mecanismo, incluindo a análise de trincas microestruturais, segregação e cinética de átomos intersticiais (hidrogênio e carbono), efeito dos elementos de liga e os possíveis meios de melhorar a resistência à fragilização por hidrogênio.

A partir dessa revisão, foi possível constatar que a adição de alumínio, bem como o refinamento de grãos e a adequada fase microestrutural, contribuem para melhorar a resistência à fragilização por hidrogênio.

Park et al. (2015) realizaram um estudo sobre inclusões presentes em aços avançados de alta resistência (AHSS) com alto teor de Mn–Al, sendo observadas inclusões formadas durante fusão e fundição. Devido ao impacto negativo dessas inclusões na ductilidade e resistência à corrosão, o objetivo desse trabalho foi analisar a corrosão por pites causada por essas inclusões nos aços AHSS (aços bifásicos DP, TRIP e TWIP) por meio de testes de perda de massa e de polarização eletroquímica em uma solução de 3,5% de NaCl. Os resultados mostraram que o aço TWIP, devido o alto teor de manganês (Fe–18Mn–0,6C), apresentou inclusões maiores em comparação aos aços DP e TRIP. Além disso, a densidade de inclusões foi maior na seguinte ordem: DP, TWIP, e aços TRIP. Como resultado o aço DP mostrou menor resistência à corrosão por pite devido à maior densidade de inclusões presentes.

Florez et al. (2019) conduziram um estudo envolvendo quatro modelos de aços de alto manganês com as seguintes composições: 28% Mn - 0,2% C, 26% Mn - 0,3% C, 23% Mn - 0,45% C e 20% Mn - 0,6% C. Foram realizados ensaios de caracterização, resistência à

corrosão em solução de NaCl 0,1 M (Potencial de Circuito Aberto- OCP, Polarização Linear) e caracterização de produtos de corrosão (EDS, MEV, Espectroscopia Raman).

Os resultados obtido em relação à resistência à corrosão mostraram que o aumento do teor de manganês resultou em valores negativos de OCP. As curvas de polarização revelaram que o aumento do teor de Mn resultou numa diminuição na resistência à corrosão. Isso sugere que o seu aumento eleva a presença de íons de Mn^{+2} , que não formam uma camada protetora de óxido na superfície. Além disso, a diminuição dos elementos de liga, como alumínio, silício e cromo, que estabilizam os óxidos, favorece a dissolução desses íons, uma vez que eles não são suficientes para proteger a superfície metálica.

Alguns outros estudos sobre a resistência à corrosão do aço de alto teor de manganês estão exibidos no Quadro 1.

Quadro 1: Estudos sobre a resistência à corrosão de aços com alto teor de manganês.

AUTORES	AMOSTRA (S)	MEIO (S)	RESULTADOS OBTIDOS
GRAJCAR, KOŁODZIEJ e KRUKIEWICZ, 2010.	Aços experimentais: 24.5Mn-3.5Si-1.5Al-Nb-Ti e 26Mn-3Si-3Al-Nb-Ti laminado a quente e tratado termicamente a 850°C.	Solução de H ₂ SO ₄ 1N e NaCl a 3,5%	Teste de imersão por 100h: Em ambas soluções dos dois aços apresentaram baixa resistência à corrosão. A perda de peso em solução de NaCl foi menor. Foi observado por MEV corrosão generalizada e por pite.
YAN, et al., 2021.	Aço contendo 20,95% wt. Mn	NaCl 3,5% a 25°C (em ciclo imerso) e 27°C (em ciclo seco)	Em corrosão cíclica seca-úmida a taxa de corrosão aumenta primeiro e depois diminui e tende a ser estável, devido camada de ferrugem, formada na superfície. Para os ensaios eletroquímicos a densidade da corrente de corrosão aumentou primeiro e depois diminuiu. Já o RP do produto de corrosão diminuiu primeiro e depois aumentou, devido a película do produto de corrosão.
PODANY, et al., 2022.	Aço experimental contendo 27,5% de Mn e 12,9% de cromo tratado termicamente e laminado a quente e a frio.	NaCl 3,5% a 70°C	O aumento da resistência à corrosão se deu pelo teor de cromo e da microestrutura monofásica uniforme. Comparado a outros aços alto Mn, apresentou melhores valores de E _{corr} e I _{corr} , esse último parâmetro semelhante aço inox AISI 420.
KANNAN et al., 2013.	Aço Fe-Mn-Al-Si, com 29,4% de Mn, laminado a frio (0, 20 e 35% de redução de espessura).	Três diferentes meios: H ₂ SO ₄ 0,1 M, NaOH 0,1 M, NaCl 3,5%	A laminação a frio não apresentou alteração significativa na suscetibilidade à corrosão nos três ambientes. Apresentou maior corrosão em meio ácido e menor em meio alcalino. Apresentou corrosão localizada e pite em ambientes com cloreto.

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

4. MATERIAIS

No desenvolvimento deste estudo, foram empregadas amostras de uma liga de aço comercial Fe-Mn-C-Cr-Cu com alto teor de manganês, austenítico de estrutura CFC, fornecidas pelo grupo sul-coreano Posco. O aço investigado foi fabricado pelo processo de alto-forno e laminado a quente. Essas amostras foram disponibilizadas em formato de chapa com espessura de aproximadamente 18 mm.

A análise da composição química do material foi realizada utilizando um Espectrômetro de Emissão Ótica do modelo PDA 7000 da marca Shimadzu. O resultado dessa análise está apresentado de forma detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composições do Aço de Alto Manganês como recebido (CR).

Elemento	Mn	Cr	Cu	C	Fe
(wt%)	26,05	3,40	0,45	0,45	Bal.

Fonte: Autoral

4.1. Processo de conformação a frio

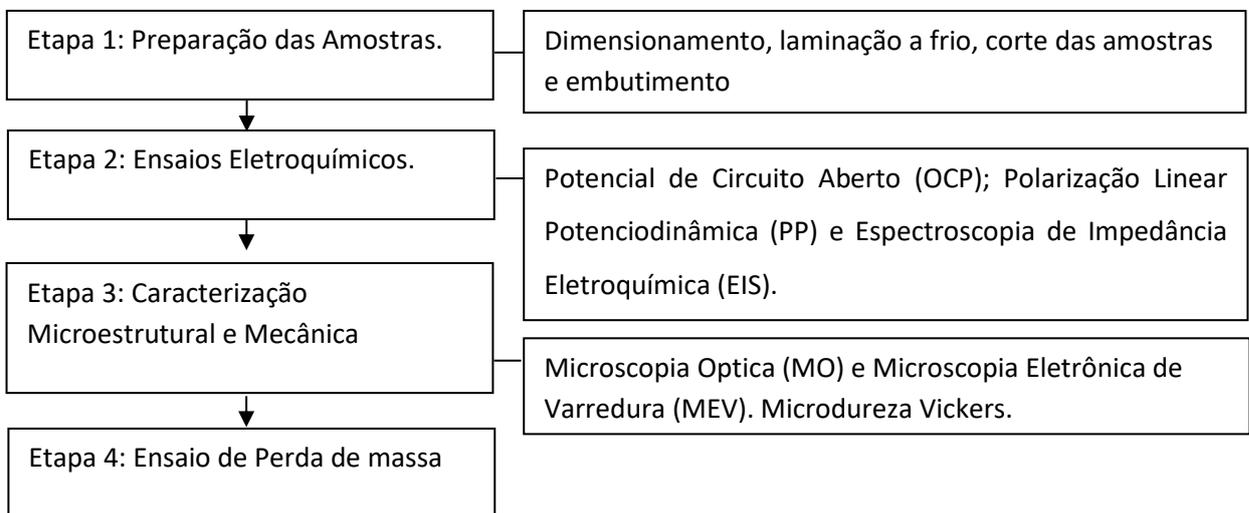
Inicialmente, as amostras foram submetidas a um processo de corte com disco abrasivo no Laboratório de Pesquisas em Corrosão (LPC) com o objetivo de reduzir suas dimensões. O processo de laminação a frio foi realizado no SENAI/CE - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, localizado em Maracanaú, utilizando um laminador piloto (Fabricante de Máquinas Coelho/Modelo LE-200B) com velocidade de rotação de 8 m/min.

Durante a laminação a frio, foram aplicadas tensões para obter diferentes valores de redução de espessura, resultando em chapas com reduções de 30%, 50% e 70%. Após o primeiro corte, a espessura foi medida em 9 mm. Com o processo de conformação, as chapas passaram a ter aproximadamente as seguintes espessuras, respectivamente: 6,3; 4,5 e 2,7 mm.

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 8 ilustra o fluxograma do procedimento experimental adotado neste estudo. A metodologia foi dividida em várias etapas, conforme descrito a seguir: Preparação das Amostras, Ensaios Eletroquímicos, Ensaio de Perda de massa e Caracterização das Microestruturas. A Etapa 1 foi conduzida tanto no LPC e no SENAI/CE de Maracanaú (CE). A Etapa 2 foi realizada exclusivamente no LPC. Enquanto a Etapa 3 foi executada no LPC e na Central Analítica do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC). Por fim, a Etapa 4 foi executada no LPC e no Laboratório de Microscopia e Caracterização dos Materiais da UFC, campus Russas (CE).

Figura 8 – Fluxograma da Metodologia



Fonte: Autoral

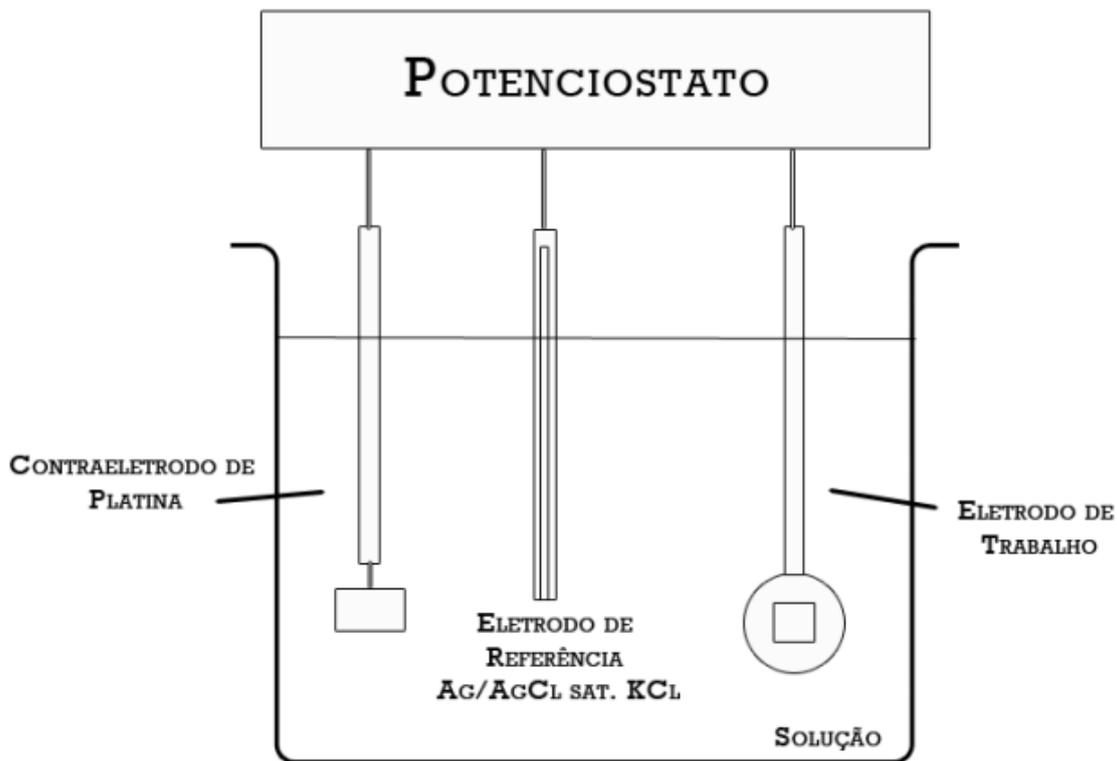
5.1. Preparação das amostras

Após a laminação a frio as amostras foram cortadas na *cut-off*, através do uso de um disco abrasivo do LPC para obter áreas de aproximadamente 1 cm x 1 cm, em seguida, as peças foram conectadas por um fio de cobre e embutidas a frio com resina epóxi. É importante ressaltar que a preparação adequada da superfície das amostras é realizada antes de qualquer ensaio. Para os ensaios eletroquímicos, as amostras passaram por um processo de lixamento utilizando lixas d'água de granulometrias 220, 320, 400 e 600. Após cada troca de lixa, o material foi cuidadosamente lavado com álcool 70% e seco com jato de ar quente. Ao concluir o uso da última lixa e realizar a limpeza final da amostra, uma camada de esmalte foi aplicada para isolar e delimitar a área entre o metal e a resina utilizada no embutimento.

5.2. Técnicas de análise eletroquímica

Para a realização das medidas eletroquímicas, foi utilizado o potenciostato/galvanostato do modelo PGSTAT30 (Autolab, Metrohm-Eco Chemie) em conjunto com o software NOVA 2.1. A Figura 9 apresenta um esquema do modelo utilizado. A célula eletroquímica selecionada para os ensaios é composta por um eletrodo de trabalho (que é o material a ser analisado), um eletrodo de referência (Ag(s)/AgCl(s)) sat. e um contra eletrodo de rede de platina. O eletrólito escolhido foi uma solução de NaCl 0,01M que foi utilizado a 25°C e com aumento da temperatura do eletrólito para 35°C e 45°C. Todos os ensaios foram realizados em triplicatas para garantir a confiabilidade dos resultados.

Figura 9 - Esquema de montagem de célula eletroquímica em um Potenciostato.



Fonte: QUEIROZ (2021).

5.2.1. Monitoramento do potencial de circuito aberto

O Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto (OCP) foi conduzido como primeira técnica eletroquímica, com uma duração de 1800 segundos e registro do potencial a cada 0,1 segundos, para verificar a estabilidade do sistema.

5.2.2. Polarização Potenciodinâmica Linear

A Polarização Linear Potenciodinâmica foi realizada após o monitoramento do OCP. Com uma variação de -0,2 V a 0,5 V em relação ao valor do OCP, utilizando uma velocidade de varredura de 1 mVs⁻¹.

A partir dos resultados obtidos foram construídos os Gráficos de Log da Densidade de Corrente versus Sobrepotencial (η), que é a diferença entre o potencial aplicado (E) e o potencial de equilíbrio (E_{eq}), Equação 8 (WOLYNEC, 2003):

$$\eta = E - E_{eq} \quad (8)$$

Por meio da análise do gráfico foi possível encontrar o potencial de corrosão (E_{corr}) e através da extrapolação do gráfico da parte anódica foi possível estimar a corrente de corrosão (I_{cor}).

Após as polarizações, as amostras foram lavadas com água destilada, em seguida passadas no álcool 70%, secadas a ar quente e analisadas por microscopia óptica. Para uma análise mais detalhada, foi aplicada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Essa técnica foi realizada na Central Analítica da UFC, utilizando um microscópio do modelo Quanta 450-FEG (FEI), a fim de obter uma caracterização adequada da morfologia de corrosão.

5.2.3. Espectroscopia de impedância eletroquímica

A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica foi realizada com uma variação 100 kHz a 6mHz, com 5 frequência por década e uma amplitude de 0,01V. Assim como o OCP e a Polarização todos os ensaios de impedância foram realizados em diferentes temperaturas (25, 35 e 45°C) para avaliar o efeito da temperatura nos resultados. Após os ensaios, diagramas de Bode de módulo de impedância e de ângulo de fase foram construídos a partir dos resultados desse ensaio foi possível obter a resistência à polarização (RP) do material.

5.3. Caracterização microestrutural e mecânica

A caracterização microestrutural foi realizada no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) da UFC, utilizando amostras brevemente embutidas a quente em baquelite no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da UFC. Para esse ensaio, foi necessário realizar um procedimento de lixamento. O material foi lixado com lixas d'água de diferentes granulometrias, incluindo 400, 600 e 1200. Em seguida, as amostras foram polidas utilizando

pano de polimento com partículas de alumina de 1µm. A solução de ataque utilizada consistiu em uma mistura de 40% de ácido nítrico e 60% de água destilada, seguindo a norma estabelecida ASTM E407, 2015. Após ataque, as superfícies das amostras foram visualizadas em um microscópio óptico Leica DMI 3000M com aumento de 500x e 1000x.

5.3.1. Microdureza Vickers

Para obter informações sobre o comportamento mecânico após o processo de lixamento, que é comumente realizado antes dos ensaios eletroquímicos, foi realizado o ensaio de Microdureza Vickers (HV). O objetivo era observar se o processo de lixamento com diferentes abrasivos (220, 320, 400 e 600 mesh) alterava as características superficiais devido à tensão sofrida durante a preparação da superfície.

Os ensaios de Microdureza Vickers foram conduzidos no Laboratório de Materiais do Instituto Federal do Ceará (IFCE), campus de Maracanaú. As microindentações de dureza foram realizadas utilizando uma carga de aproximadamente 10 N por 10 segundos. O material foi inicialmente lixado com lixa de granulometria 220, lavado com água destilada e álcool etílico. Sendo realizadas três medições, o mesmo procedimento foi repetido com as outras lixas (320, 400 e 600).

5.4. Perda de massa

O ensaio de perda de massa é empregado para estimar a taxa de corrosão seguindo a ASTM G31-72. O presente estudo conduziu o ensaio ao longo de um período de 24h, mediante a imersão das amostras em solução de NaCl 0,01M. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos, com áreas totais resultante da soma das superfícies, aproximadamente, 14 cm² para a peça como recebida, 12 cm² para a laminada com 30% de redução e 10 cm² para laminada 50%. Todos os ensaios foram realizados com triplicatas e conduzidos sob três diferentes condições temperaturas (25, 35 e 45°C).

Cada amostra passou por um processo de decapagem em solução de Clark por 2 minutos. Posteriormente, o material foi enxaguado com água corrente e desengordurado. Após essa limpeza inicial, as amostras foram lavadas com água destilada e, em seguida, com álcool 70%. Após a secagem, as amostras foram medidas na balança analítica, identificadas e então imersas na solução pelo tempo estipulado.

Após o período de 24 horas, as amostras foram retiradas da solução, submetidas a uma solução de Clark por 30 segundos e seguiram os mesmos passos iniciais para a obtenção

das medidas finais. Esse processo foi repetido quatro vezes, a fim de igualar o tempo de decaagem em todas as medições, o que possibilitou uma remoção mais eficiente dos óxidos aderidos. A medida final selecionada foi aquela obtida na quarta repetição, representando o último ciclo do ensaio. A taxa de corrosão foi estimada a partir da Equação (9).

$$\text{Taxa de corrosão} = \frac{K*W}{A*T*D} \quad (9)$$

Onde K é uma constante de conversão, W é a perda de massa (g), A é a área (cm²), T é o tempo de imersão (horas) e D é a densidade do material (g/cm³).

Após os ensaios de perda de massa, foi conduzida uma análise microestrutural das amostras por meio de espectroscopia de raios-x por energia dispersiva (EDS), com o objetivo de examinar os produtos de corrosão presentes na superfície do material após imersão em 0,1M de NaCl por 24 horas. O ensaio de EDS foi realizado no Laboratório de Microscopia e Caracterização dos Materiais na UFC, campus Russas, com o MEV da marca Tescan modelo Vega XMU e o EDS foi coletado no MEV usando um detector Bruker AXS XFlash 4010.

Tal técnica, visa caracterizar a composição química de uma dada superfície da amostra a partir da detecção de raios-X emitidos durante o bombardeio com feixes de elétrons, que possibilita uma análise das amostras por meio do mapeamento elementar, onde variações na intensidade de energia indicam a concentração relativa do elemento na superfície (Materials Evaluation and Engineering, 2016).

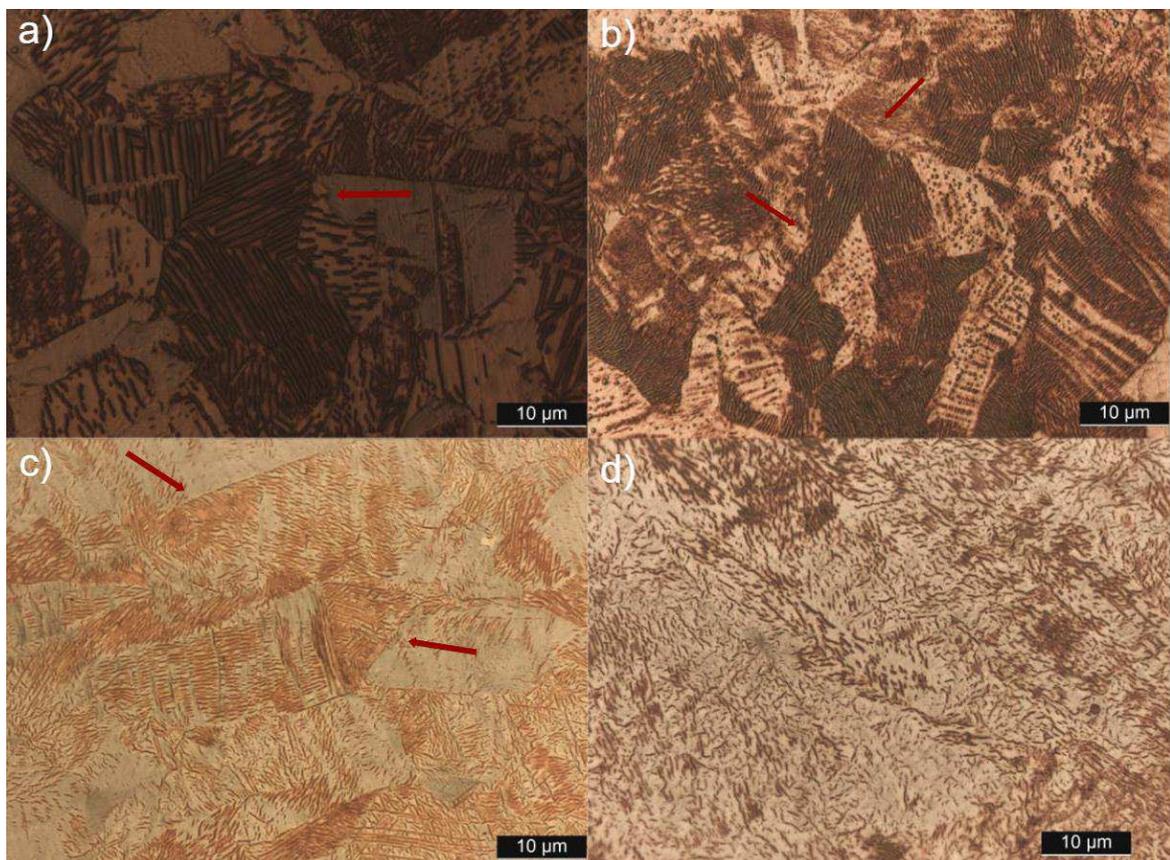
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Microestrutura

As micrografias das amostras como recebida (CR), 30, 50 e 70% de redução por laminação a frio, obtidas por Microscópio Óptico, estão apresentadas na Figura 10. A amostra CR apresentou uma microestrutura com poucas maclas mecânicas, originadas pelo processo de laminação a frio. A partir de 30% de redução de espessura observou-se um aumento da formação do número de maclas, conforme investigado por Lima *et al.*, (2022).

A partir deste estudo realizado por Lima *et al.*, destacaram que o aumento nas maclas mecânicas está associado à baixa energia de falha de empilhamento do material (EFE) que esse material possui, sendo de aproximadamente 21 mJ/m² à temperatura ambiente. A redução de 70% resulta na formação de maclas, atribuído ao processo de laminação a frio que conforme aumenta a magnitude da redução de espessura há mudanças na microestrutura do material.

Figura 10 – Micrografias óticas das ligas 26Mn a) CR – 1000x; b) 30% – 1000x; c) 50% – 1000x; d) 70% – 1000x. Reagente de ataque – 60% Água destilada + 40% Ácido Nítrico.



Fonte: Autoral

6.2. Microdureza vickers e a influência da preparação da superfície metálica

Há um aumento na microdureza que é atribuído às distintas características microestruturais apresentadas no tópico anterior. O material como recebido exibiu uma média de microdureza em torno de 229,0 HV1. A partir de uma redução de 30%, a microdureza do material aumentou para 417,2 HV1, atingindo 482,5 HV1 com uma redução de 50%, e alcançando uma microdureza de 524,0 HV1 com uma redução de 70%. Tais resultados estão em conformidade com estudos feitos por Florez *et al.*, (2019), que apresentou uma microdureza de 225,0 HV1 para um material de composição de 26% de manganês e também estão condicentes com as análises de Lima *et al.*, (2022) para reduções de 50 e 70%.

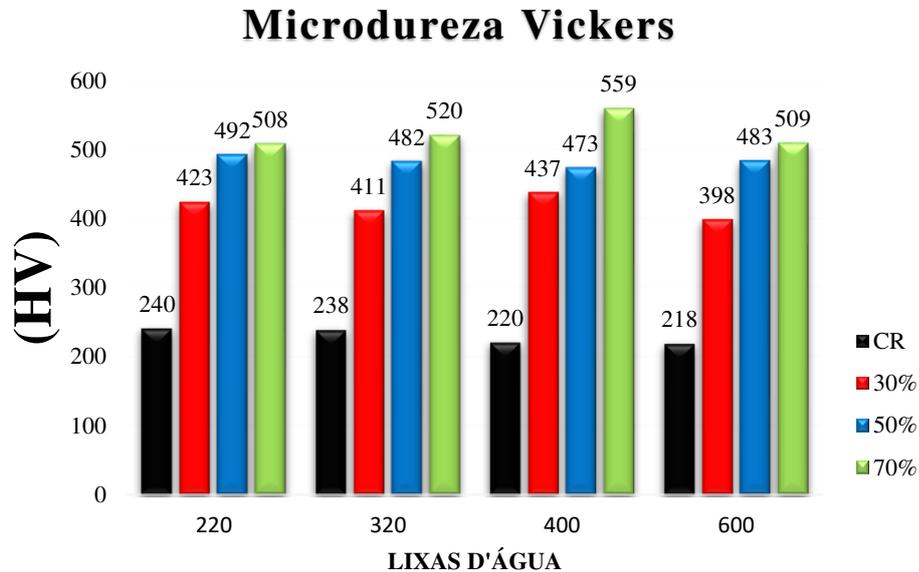
Tabela 2 - Valores de microdureza Vickers obtidos através do processo de tratamento superficial por lixamento com lixas de granulometrias 220, 320, 400 e 600 para o material 26Mn como recebido e laminado a frio em diferentes reduções de espessuras.

Amostras	Média (HV1)	Maior Valor (HV1)	Menor Valor (HV1)	Desvio Padrão
0%-CR	229,0	240,0	218,0	11,6
30%	417,2	437,0	398,0	16,7
50%	482,5	492,0	473,0	7,8
70%	524,0	559,0	508,0	24,0

Fonte: Autoral.

Conforme evidenciado na Tabela 2, a preparação superficial comumente realizada anteriormente aos ensaios eletroquímicos, por meio do lixamento, não demonstrou uma alteração significativa na dureza do material. Os valores de microdureza Vickers obtidos para o 26Mn em diversas espessuras de laminação a frio, em conjunto com diferentes processos de lixamento, são apresentados no Figura 11. Nota-se que, de fato, cada processo de lixamento, inicialmente usando a lixa 220, em seguida 320, 400 e 600, não exerce uma influência significativa na microdureza do material, em cada processo individual. Por outro lado, o processo ocorrido durante a conformação a frio resulta em um aumento na microdureza. Na liga com 70% de redução de espessura, por exemplo, em comparação com a liga não submetida ao processo de laminação a frio (CR), esse aumento foi acima de 100%. Tais resultados evidenciam que a preparação das amostras por meio do lixamento não altera de forma significativa a superfície do material, sendo assim mantido esse tipo de preparação utilizada antecedente aos ensaios eletroquímicos.

Figura 11- Microdureza Vickers do material como recebido 26Mn, 30, 50 e 70% de redução de espessura pelo processo de laminação a frio e lixado por lixas d'água com granulometrias 220, 320, 400.



Fonte: Autoral

6.3. Monitoramento do potencial de circuito aberto

A Tabela 3 apresenta os valores médios e os desvios padrão dos potenciais de circuito aberto (OCP) obtidos para o material com 26% de Mn, em diversas condições de conformação a frio (0%, 30%, 50% e 70% de redução na espessura do material) e com variações de temperatura (25°C, 35°C e 45°C). Todos os ensaios foram realizados em uma solução de NaCl 0,01 M após um monitoramento de 1800 segundos.

Para a temperatura de 25°C, o material apresentou resultados semelhantes, independentemente da laminação a frio. Com o aumento da temperatura para 35°C, observou-se uma pequena diminuição nos valores do potencial para os materiais como recebido (CR - sem redução de espessura por laminação a frio), e para aqueles com 30% e 50% de redução. No entanto, para 70% de redução, o material manteve um OCP semelhante nas três temperaturas.

A 45°C, houve uma redução nos valores de OCP para o material CR e para o material com 30% de redução. Por outro lado, para o material com 50% de redução, observou-se um aumento no valor de OCP. Em geral, os valores, nas três temperaturas e nas diferentes

condições de tensão impostas pela laminação, apresentaram resultados muito próximos, variando entre -0,548 e -0,443.

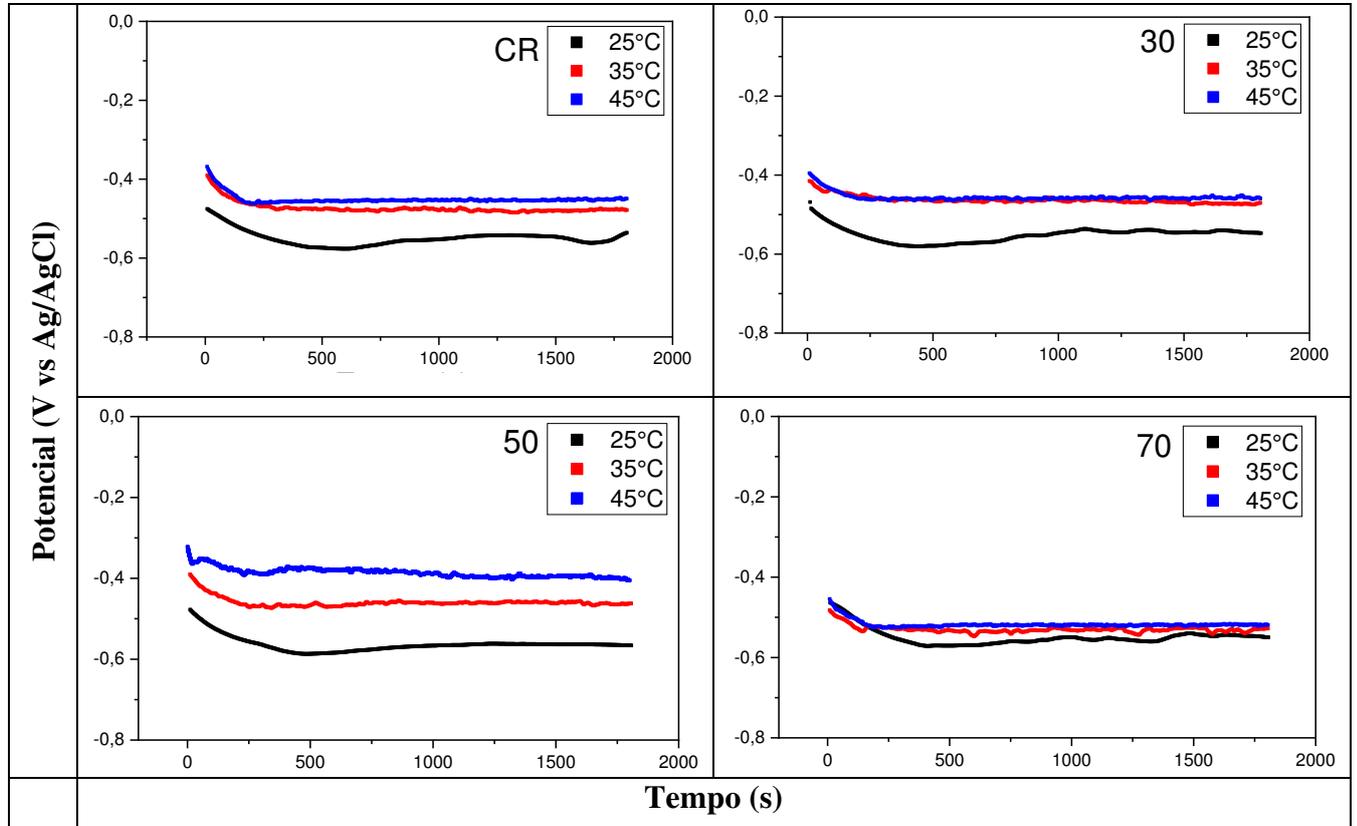
Tabela 3 – Média dos valores de Potencial de Circuito Aberto obtidos para a liga como recebida (CR) e laminadas 30, 50 e 70% de redução em solução 0,01 M de NaCl a diferentes valores de temperatura.

%	25°C	35°C	45°C
0-CR	-0,548±0,022	-0,445±0,054	-0,443±0,009
30	-0,541±0,005	-0,460±0,027	-0,457±0,005
50	-0,546±0,027	-0,471±0,008	-0,533±0,055
70	-0,548±0,009	-0,531±0,012	-0,535±0,014

Fonte: Autoral

A Figura 12 exibe os resultados obtidos dos potenciais de circuito aberto, analisando o efeito da temperatura do eletrólito. Observa-se que o período de 1800 segundos foi suficiente para estabilizar o potencial no sistema. Como característica, nota-se, em todas as condições, uma leve queda de potencial no início do ensaio, seguida por uma estabilização em potenciais negativos. De acordo com Florez et al. (2019), essa tendência é atribuída às interações da superfície do metal com o meio. Vale ressaltar que essa técnica é exclusivamente empregada para identificar inclinações termodinâmicas nas reações que ocorrem no sistema (JIMENEZ et al., 2009).

Figura 12 – Monitoramento de Circuito Aberto (OCP) do como recebido (CR), 30%, 50% e 70% de redução por Laminação a Frio, em diferentes temperaturas de aquecimento do eletrólito (25°C, 35°C e 45°C).

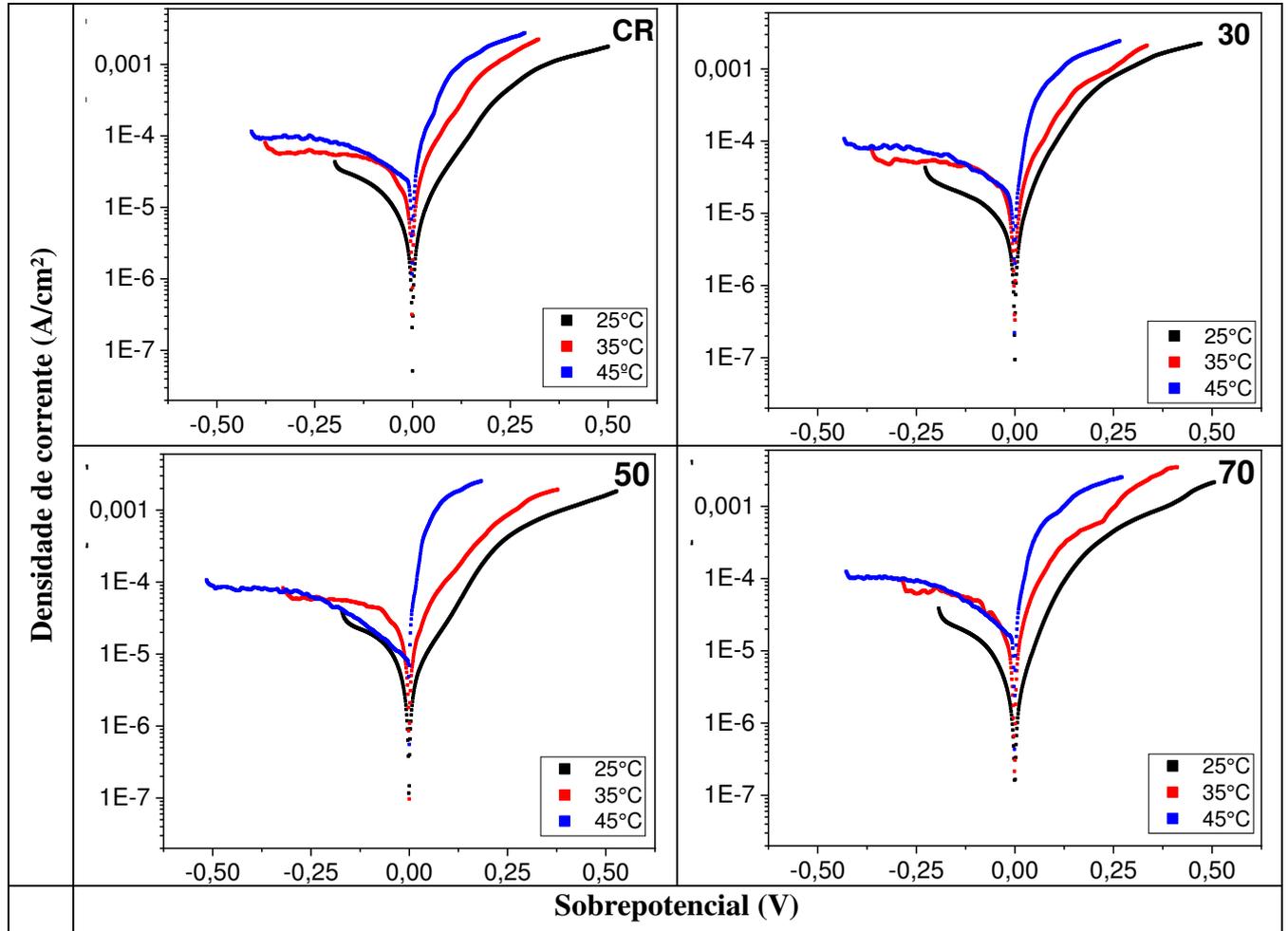


Fonte: Autoral

6.4. Polarização potenciodinâmica linear

A Figura 13 apresenta as curvas de polarização linear relacionando a densidade de corrente do material vs o sobrepotencial. Foram feitas curvas para o material como recebido e com diferentes reduções de espessura por laminação a frio, além de variar a temperatura do eletrólito.

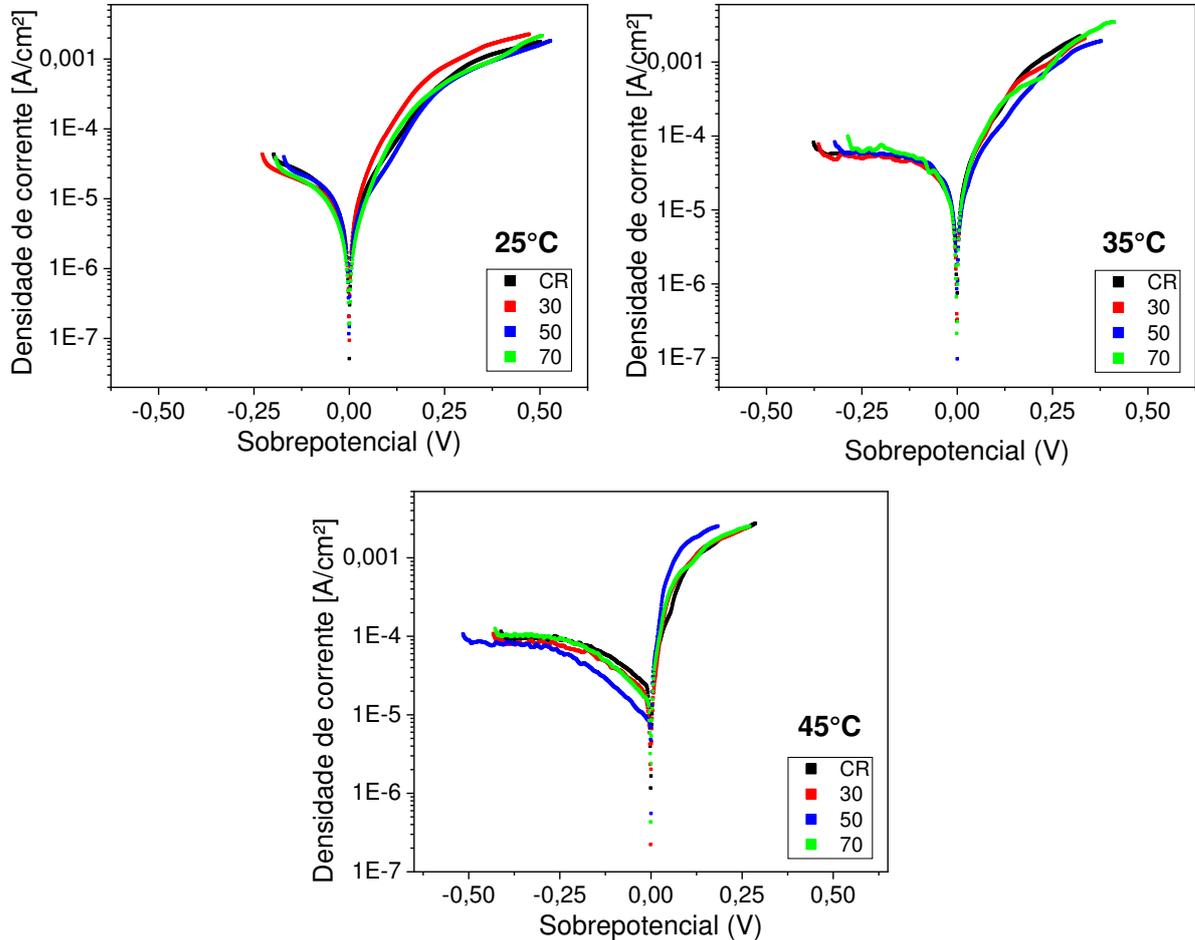
Figura 13 - Curvas de polarização linear da liga 26% de Mn como recebida, e laminada a frio com redução de espessura de 30, 50, 70% comparadas com diferentes temperaturas.



Fonte: Autoral

A Figura 14, assim como a anterior, exibe as curvas de polarização linear, desta vez, comparando as amostras laminadas em diferentes temperaturas, a fim de verificar a influência do processo de laminação a frio na resistência à corrosão.

Figura 14 – Curva de polarização linear potenciodinâmica do CR, 30%, 50% e 70% em diferentes temperaturas (25°C, 35°C e 45°C).



Fonte: Autoral

Para a Figura 13 o material como recebido (CR), 30, 50 e 70% de redução de laminação a frio, todas as amostras apresentaram um aumento na densidade de corrente do material conforme o aumento da temperatura. Já o comparativo de laminação mostrado na Figura 14, apresenta pouca variação na densidade de corrente com a diminuição de espessura do material.

A Tabela 4 exhibe os valores do potencial de corrosão para todas as laminações e temperaturas empregadas. Em comparação com a Tabela 2, que mostra os valores de pontencial de circuito aberto, nota-se que as curvas de polarização potenciodinâmica, em solução de 0,01M, exibem um valor de potencial de corrosão mais nobre. Isso pode ser atribuído às oscilações no sistema até que um valor estável seja alcançado, como evidenciado nos resultados obtidos por Mohammed, Yahya e Elramady (2010), que investigaram a influência da

temperatura em uma solução de NH_4NO_3 . Além disso, este estudo apresentou resultados semelhantes aos aqui apresentados.

À medida que a temperatura aumenta, o potencial de corrosão atinge valores mais nobres. Este comportamento, indicado pelo potencial de corrosão, sugere que há processos ocorrendo na superfície do material com o aumento da temperatura do eletrólito. Isso pode ser atribuído à formação e crescimento de um filme de Fe_2O_3 na superfície corrosiva, conforme discutido por Mohammed, Yahya e Elramady (2010) e Hussein e Hasan (2016).

Isso ocorre porque, à medida que a temperatura aumenta (Figura 12), observa-se um aumento na densidade de corrente. Entretanto, com o aumento da temperatura, o E_{corr} se desloca para valores mais positivos. Isso pode ser atribuído à diminuição do potencial de equilíbrio do Ferro e H_2 , ao aumento do potencial de equilíbrio do gás oxigênio e ao aumento do seu coeficiente de difusão molecular, resultando na redução da solubilidade de O_2 (HASAN et al., 2011). Para o E_{corr} ir para valores mais nobres, pode indicar também que esteja ocorrendo um aumento nas reações da área catódica.

Tabela 4 – Média dos valores de Potencial de Corrosão - E_{corr} obtidos para a liga como recebida (CR) e laminadas 30, 50 e 70% de redução em solução 0,01 M de NaCl a diferentes valores de temperatura.

%	25°C	35°C	45°C
0-CR	-0,489±0,101	-0,336±0,031	-0,238±0,045
30	0,472±0,042	-0,307±0,024	-0,236±0,038
50	-0,504±0,090	-0,341±0,003	-0,355±0,105
70	-0,500±0,052	-0,373±0,100	-0,309±0,059

Fonte: Autoral

A Tabela 5 exibe os resultados da corrente de corrosão, I_{corr} . A análise das curvas de polarização das reações envolvidas no processo corrosivo possibilita tanto o cálculo do potencial de corrosão, conforme destacado na Tabela 4, bem como a determinação da taxa de corrosão, Tabela 5, a qual é derivada do I_{corr} mediante a extrapolação de Tafel da área anódica (WOLYNEC, 2003).

É possível observar um aumento significativo na taxa de corrosão ao elevar a temperatura para 45°C, especialmente nas curvas correspondentes ao material CR e a 70%. Até 35°C, não se observou um aumento considerável; os valores das taxas de corrosão obtidos a

partir das triplicatas permaneceram semelhantes aos registrados a 25°C. Sugerindo que temperaturas superiores a 35°C intensificam a cinética das reações de corrosão.

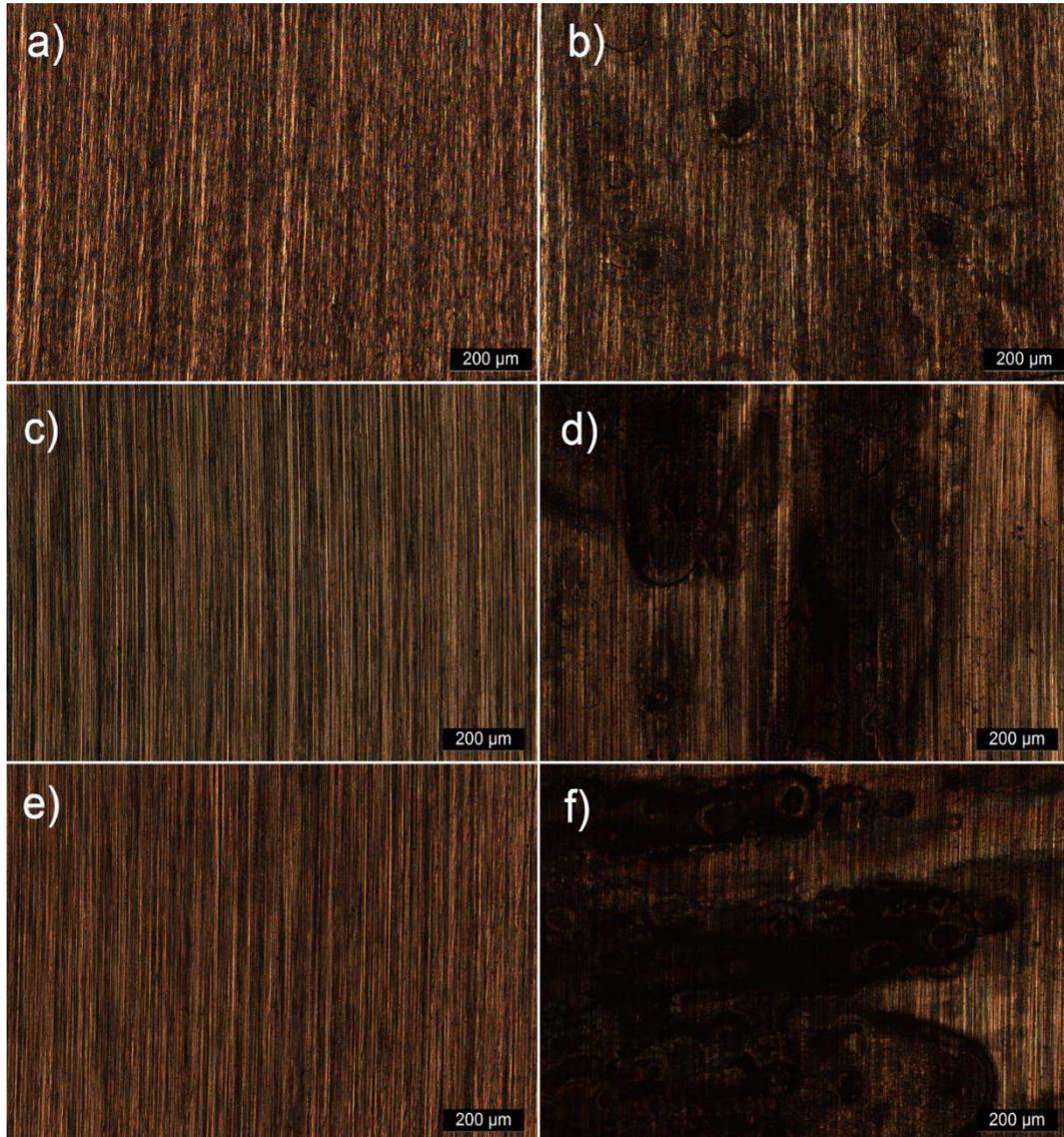
Tabela 5 – Média dos valores da Corrente de Corrosão - I_{corr} Ω/cm^2 obtidos para a liga como recebida (CR) e laminadas 30, 50 e 70% de redução em solução 0,01 M de NaCl a diferentes valores de temperatura.

%	25°C	35°C	45°C
0-CR	(2,22 ± 0,42) E-4	(2,12 ± 0,09) E-4	(7,93 ± 0,17) E-4
30	(1,99 ± 0,90) E-4	(1,58 ± 0,29) E-4	(4,38 ± 0,90) E-4
50	(1,80 ± 0,87) E-4	(1,43 ± 0,88) E-4	(4,08 ± 0,80) E-4
70	(1,39 ± 0,44) E-4	(1,39 ± 0,77) E-4	(6,77 ± 0,99) E-4

Fonte: Autoral

As Figuras 15, 16, 17 e 18 mostram as micrografias ópticas da liga de alto manganês 26% como recebida e contendo diferentes reduções de laminação a frio, antes e após os ensaios de polarização potenciodinâmica linear em solução de 0,01M de NaCl com diferentes valores de temperatura. Pode-se observar uma corrosão generalizada em todos os casos, sendo intensificadas com o aumento da temperatura, esse aumento de degradação é esperado para materiais comuns de aço carbono.

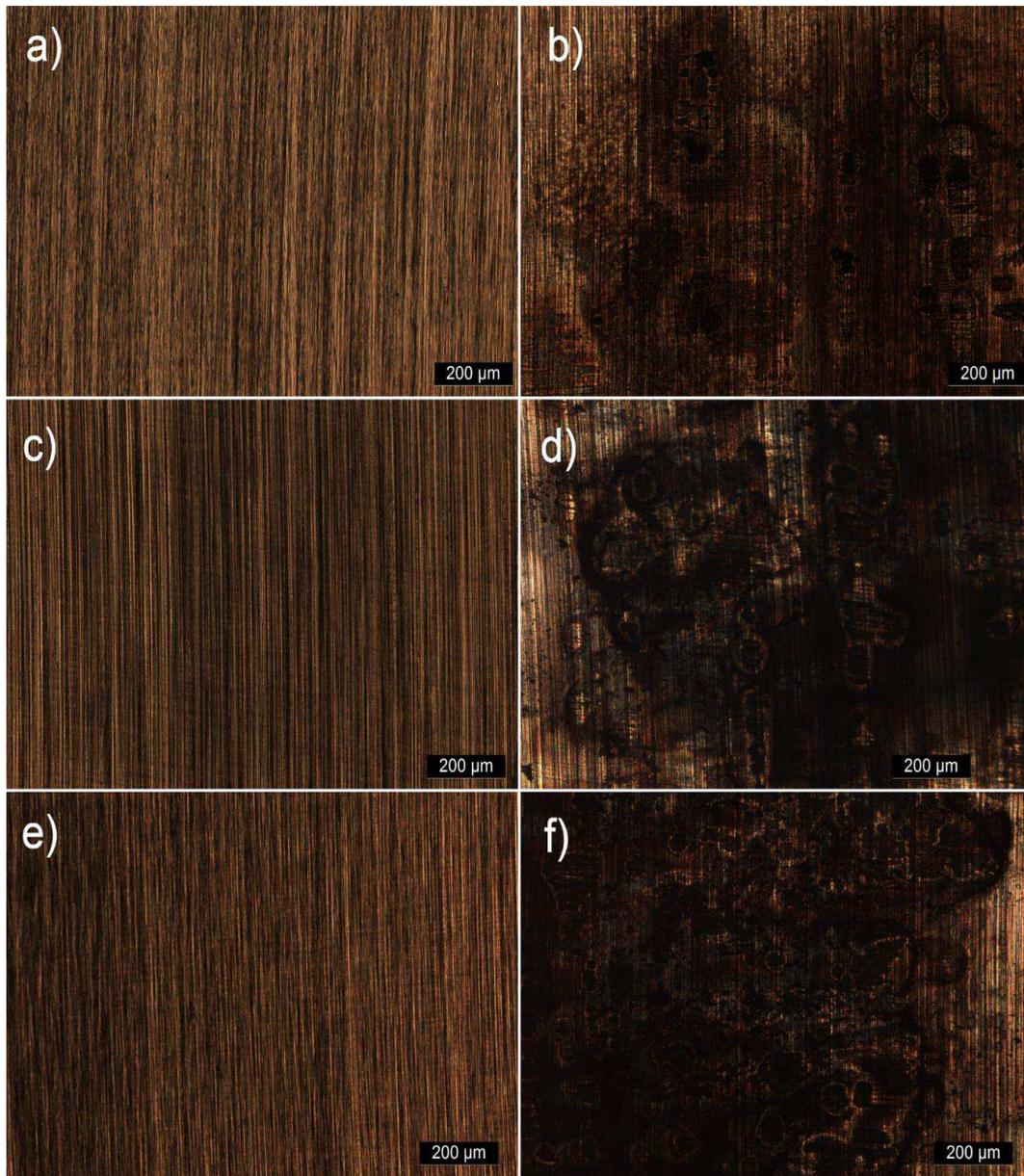
Figura 15 - Micrografias ópticas da liga de alto Mn – CR: a) 25°C pré-polarização; b) 25°C pós-polarização; c) 35°C pré-polarização; d) 35°C pós-polarização; e) 45°C pré-polarização; e f) 45°C pós-polarização. Todas as imagens com aumento de 50x.



Fonte: Autoral

As micrografias obtidas revelaram uma semelhança entre as amostras. No entanto, ao reduzir a espessura em 30% por laminação a frio, Figura 16, as imagens exibem uma degradação comparável, mesmo com o aumento da temperatura, principalmente, nas temperaturas de 35°C e 45°C, a degradação da superfície metálica se torna mais evidente.

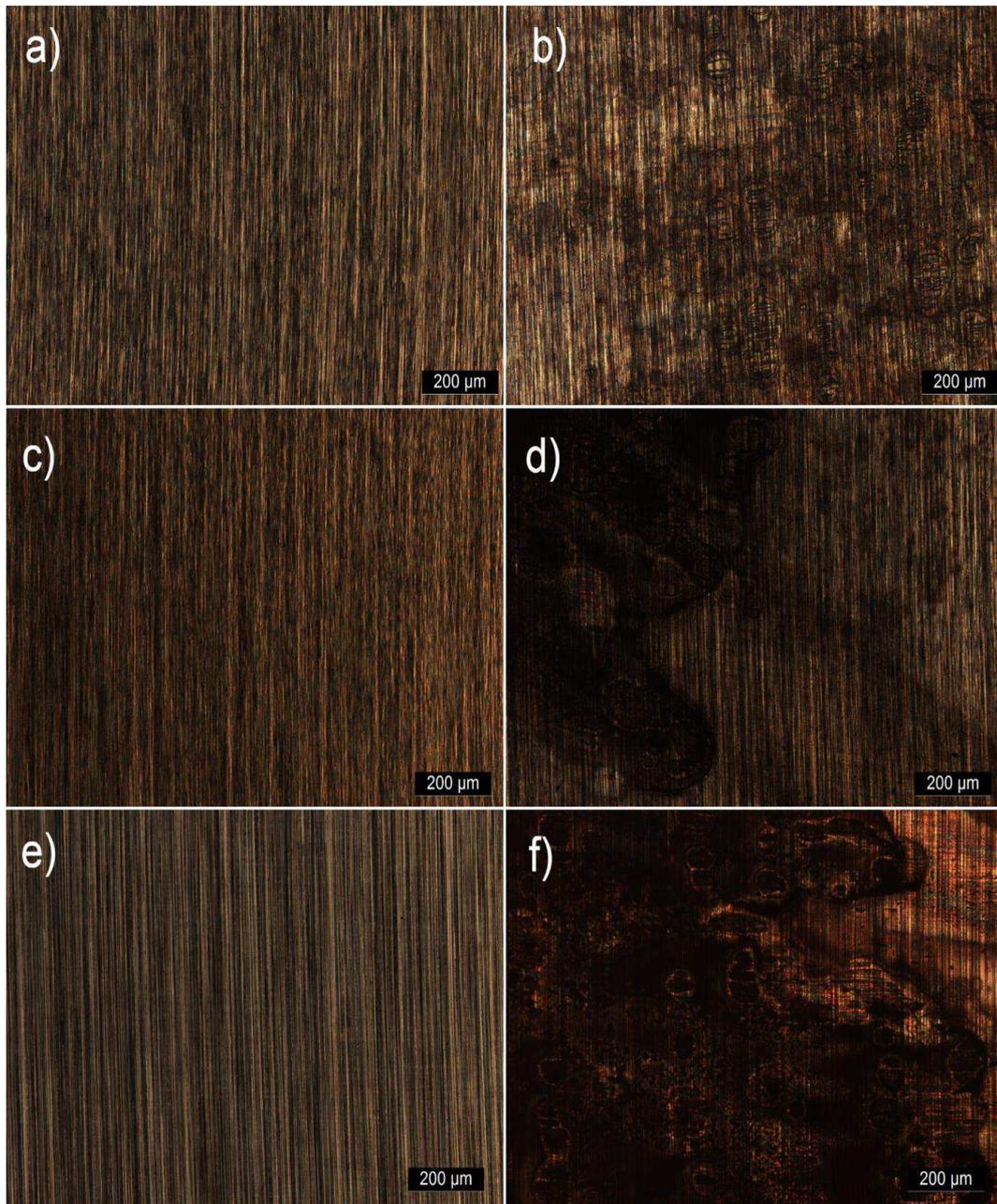
Figura 16 - Micrografias ópticas da liga de alto Mn – 30% de redução de laminação: a) 25°C pré-polarização; b) 25°C pós-polarização; c) 35°C pré-polarização; d) 35°C pós-polarização; e) 45°C pré-polarização; e f) 45°C pós-polarização. Todas as imagens com aumento de 50x.



Fonte: Autoral

Ao reduzir a espessura em 50% por meio de laminação a frio, as imagens da Figura 17 evidenciaram de maneira mais acentuada a degradação da superfície conforme a temperatura aumentou para 35°C e 45°C. Em contraste, a superfície apresentou menor degradação a 25°C.

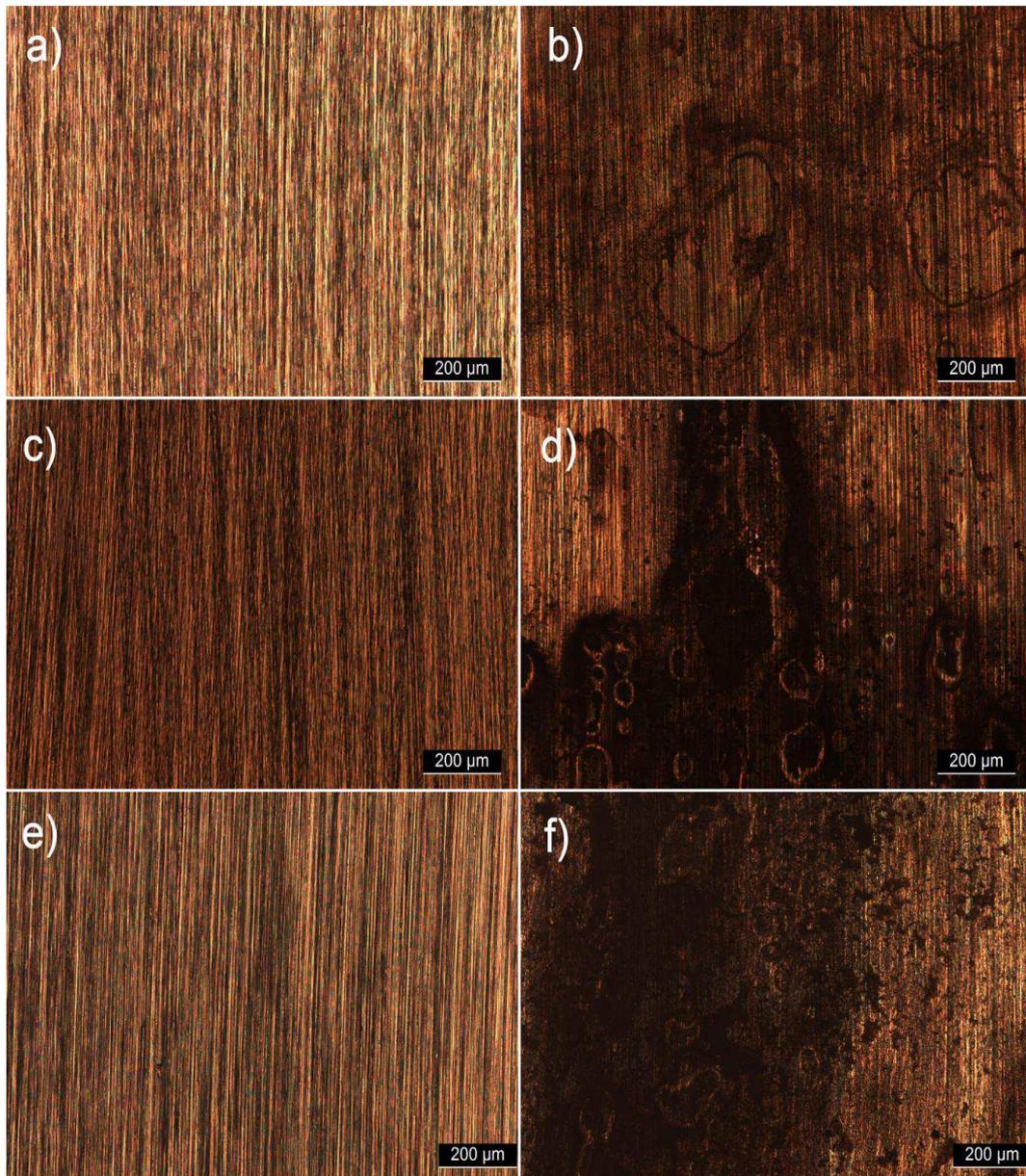
Figura 17 - Micrografias ópticas da liga de alto Mn – 50% de redução de laminação: a) 25°C pré-polarização; b) 25°C pós-polarização; c) 35°C pré-polarização; d) 35°C pós-polarização; e) 45°C pré-polarização; e f) 45°C pós-polarização. Todas as imagens com aumento de 50x.



Fonte: Autoral

Semelhante a Figura 17, a Figura 18 apresenta uma superfície mais afetada após polarização conforme se teve o aumento da temperatura, evidenciando uma corrosão uniforme mais externa em toda superfície metálica do material com 70% de redução por laminação a frio.

Figura 18 - Micrografias ópticas da liga de alto Mn – 70% de redução de laminação: a) 25°C pré-polarização; b) 25°C pós-polarização; c) 35°C pré-polarização; d) 35°C pós-polarização; e) 45°C pré-polarização; e f) 45°C pós-polarização. Todas as imagens com aumento de 50x.

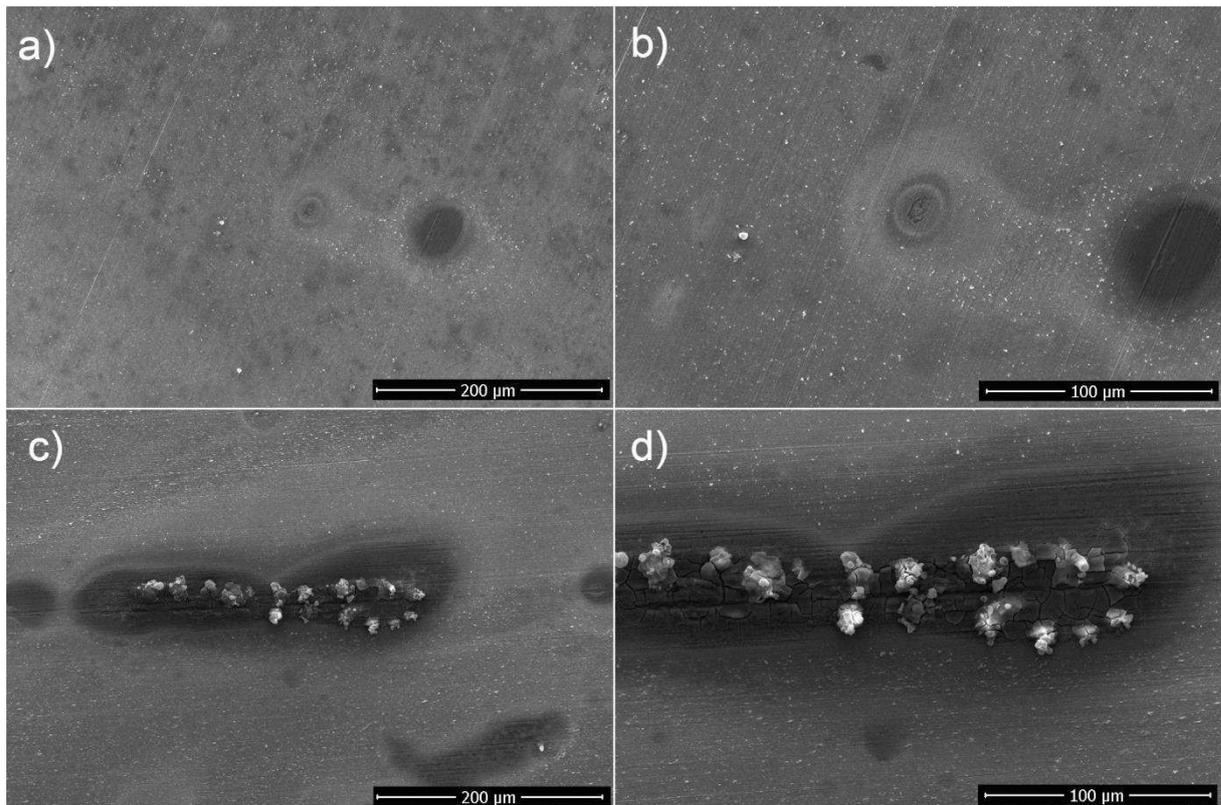


Fonte: Autoral

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura - MEV. Foram realizadas capturas pós-polarização potenciodinâmica do material nas condições inicial e laminado em 50% e 70%, para as temperaturas de 25°C e 45°C após a técnica eletroquímica. Essas amostras foram escolhidas por representarem os extremos de cada situação, sem redução por laminação e com as maiores reduções, enquanto as temperaturas selecionadas representam a menor e maior temperatura investigada nesta pesquisa.

Conforme evidenciado pelas imagens de microscopia óptica, a análise por MEV revelou, na Figura 19, uma corrosão uniforme, manifestada em alguns pontos com variações no produto de corrosão, conforme destacado no aumento da resolução das imagens. Com o aumento da temperatura, observou-se uma degradação mais acentuada para o material como recebido, acompanhada pela formação de produtos de corrosão.

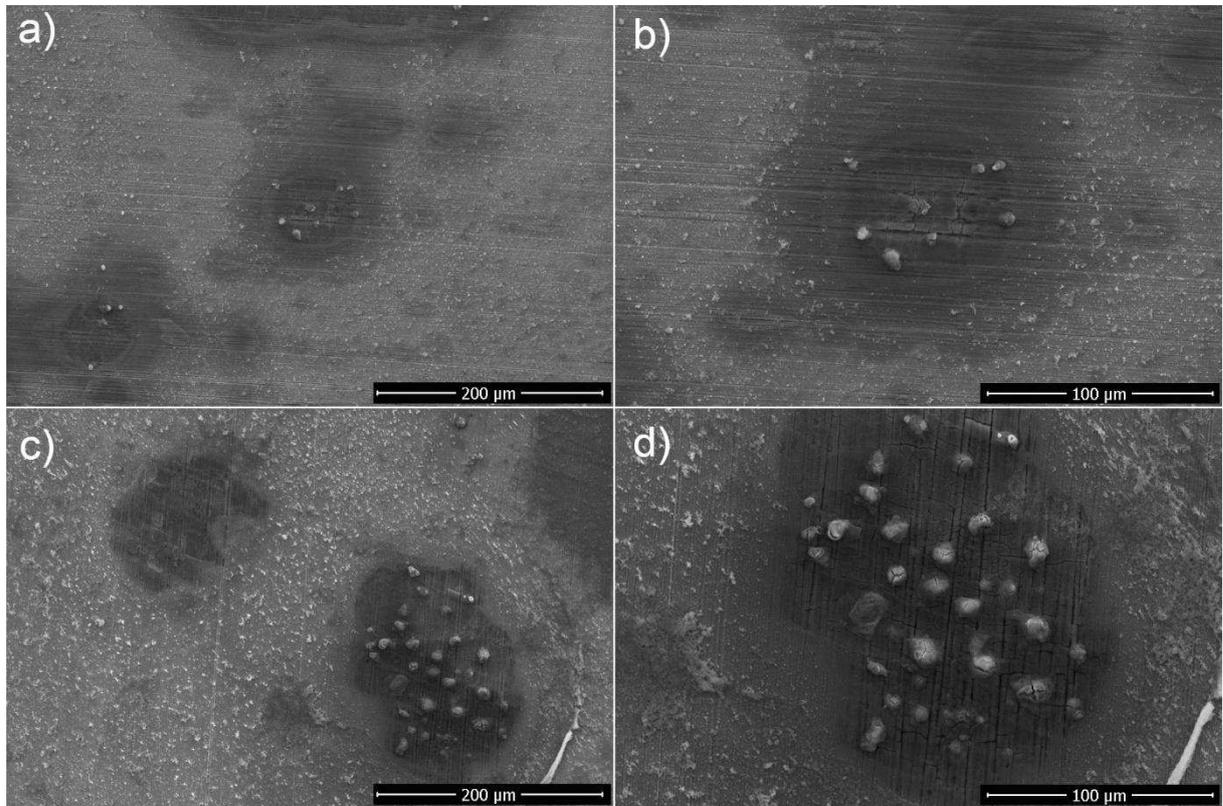
Figura 19 - Micrografias eletrônicas de varredura da liga alto Mn CR: a) e b) 25°C; c) e d) 45°C; após polarização.



Fonte: Autoral

A análise por MEV na Figura 20, com 50% de redução por laminação a frio, revelou uma superfície mais degradada em comparação com o material como recebido. No entanto, semelhante à Figura 19, essa degradação foi manifestada em pontos específicos, apresentando várias erupções com produto de corrosão. O aumento da resolução destacou esses pontos de maneira mais evidente, especialmente nas temperaturas de 25°C e 45°C. Conforme a temperatura aumentou, a degradação se estendeu para uma área superficial mais ampla.

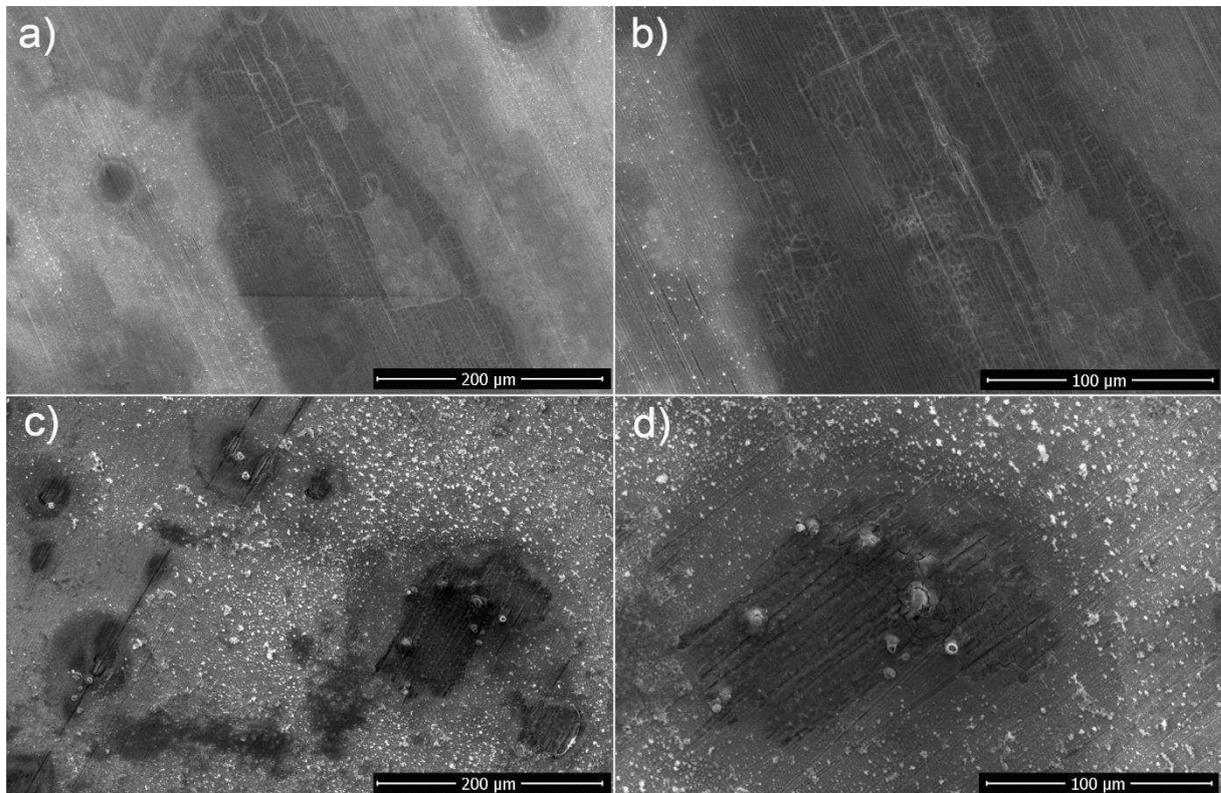
Figura 20- Micrografias eletrônicas de varredura da liga alto Mn laminado a frio 50%: a) e b) 25°C; c) e d) 45°C; após polarização.



Fonte: Autoral

A Figura 21 exibe as imagens obtidas para uma redução de 70% por laminação a frio. Assim como nos demais resultados, observou-se que o aumento da temperatura intensificou a corrosão na superfície metálica. Além disso, surgiram pites acompanhadas por possíveis produtos de corrosão. Pequenas rachaduras tornaram-se mais evidentes em comparação com outras condições, indicando também uma corrosão generalizada.

Figura 21- Micrografias eletrônicas de varredura da liga alto Mn laminado a frio 70%: a) e b) 25°C; c) e d) 45°C; após polarização.



Fonte: Autoral

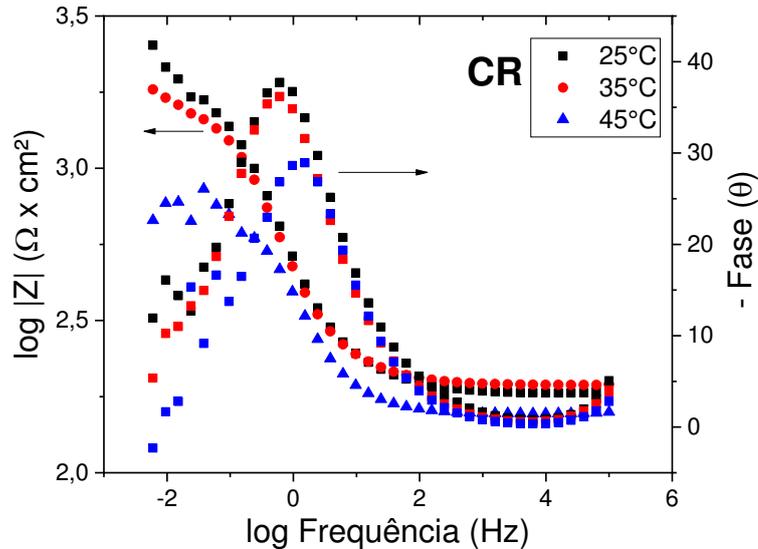
6.5. Espectroscopia de impedância eletroquímica

Os testes eletroquímicos proporcionaram uma compreensão do comportamento das amostras à medida que as deformações aumentavam, visando compreender o efeito da laminação. Por outro lado, a variação nas faixas de temperatura do eletrólito (25°C, 35°C e 45°C) permitiu a observação do impacto desse parâmetro na cinética da corrosão, indicando se este é favorável ou não ao processo corrosivo.

As Figuras 22, 23, 24 e 25 mostram as curvas de Bode obtidas a partir dos ensaios de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE). Com o aumento da temperatura houve uma redução no módulo de impedância. Na Figura 22, é possível observar os diagramas de Bode referentes a amostra CR, nota-se uma queda na resistência à corrosão somente a partir de 45°C. Nas amostras laminadas a 30%, evidencia-se uma diminuição pouco acentuada a partir de 35°C. Por outro lado, nas amostras 50% e 70%, a queda da resistência é mais acentuada a partir de 35°C. Isso pode ser atribuído à alteração da microestrutura do material, na qual há um aumento das maclas mecânicas no material laminado a frio, o que ocorre especialmente em 50% e 70% (LIMA et al., 2022). Em relação ao diagrama do ângulo de fase, foi observado que

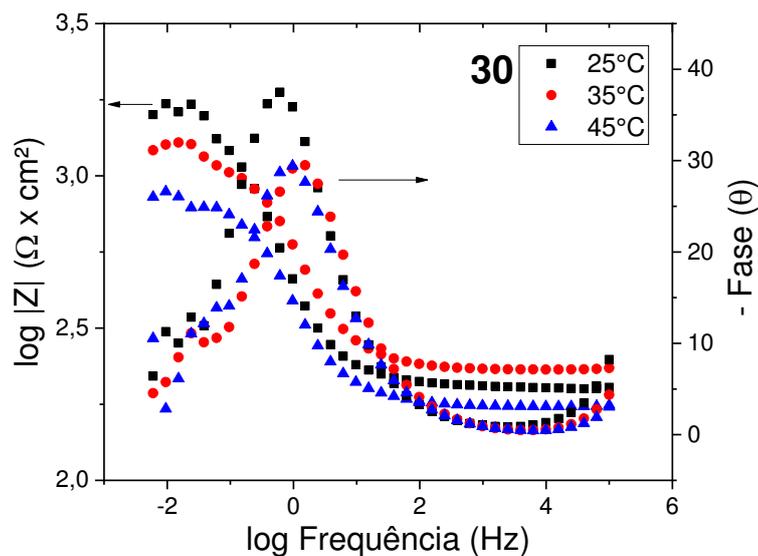
em todas as condições apresentaram um único pico de pequena largura com ângulo de fase máximo entre 30° e 45° graus, além disso houve um deslocamento dos picos em direção a uma região com maior frequência.

Figura 22 – Gráfico de Bode dos espectros de impedância (log F vs log Z e ângulo de -Fase) para como recebido em diferentes temperaturas (25°C, 35°C e 45°C).



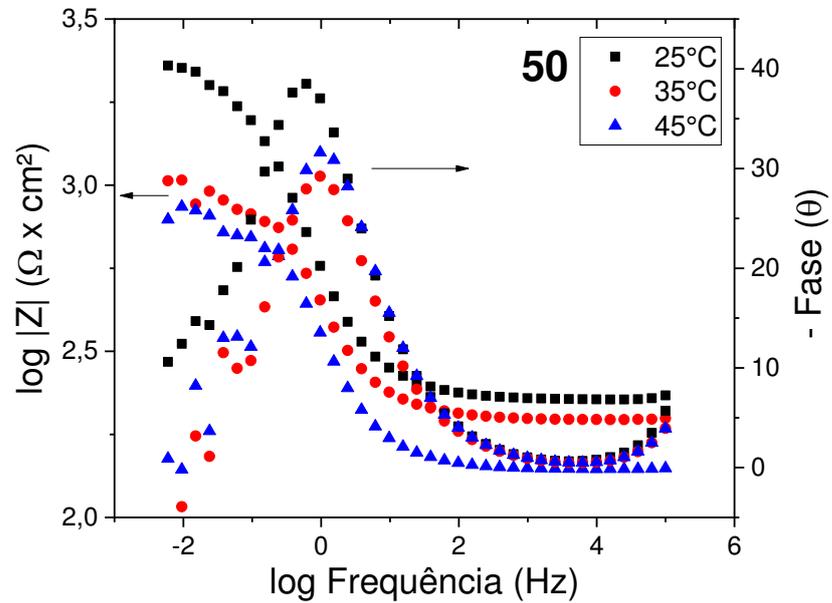
Fonte: Autoral

Figura 23 - Gráfico de Bode do espectro de impedância (log F vs log Z e ângulo de -Fase) para 30% de redução por laminação a frio em diferentes temperaturas (25°C, 35°C e 45°C).



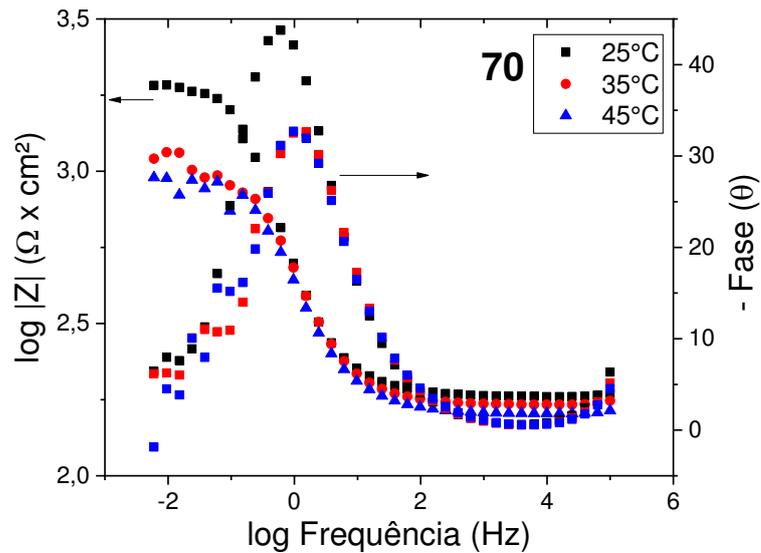
Fonte: Autoral

Figura 24 - Gráfico de Bode do espectro de impedância (log F vs log Z e ângulo de -Fase) para 50% de redução por laminação a frio em diferentes temperaturas (25°C, 35°C e 45°C).



Fonte: Autoral

Figura 25 - Gráfico de Bode do espectro de impedância (log F vs log Z e ângulo de -Fase) para 70% de redução por laminação a frio em diferentes temperaturas (25°C, 35°C e 45°C).

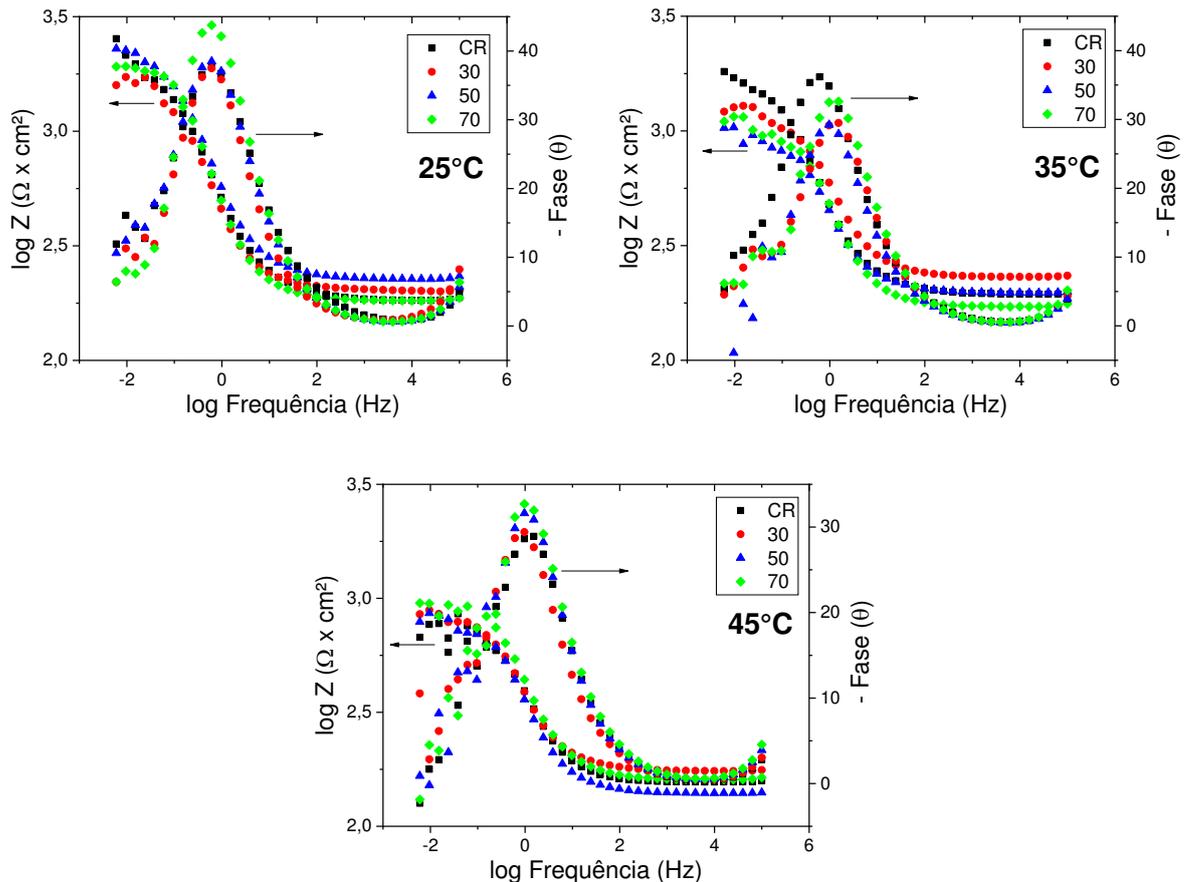


Fonte: Autoral

A Figura 26 exibe os mesmos resultados anteriormente obtidos, proporcionando uma visualização mais clara e comparativa das reduções por laminação a frio na espectroscopia

de impedância eletroquímica. É evidente que, independentemente do grau de redução na laminação, o módulo de impedância permanece bastante consistente. A única exceção ocorreu a 35°C, onde houve um ligeiro aumento para o material como recebido. No entanto, todas as quatro amostras demonstraram valores próximos.

Figura 26 - Gráficos de Bode do espectro de impedância (log F vs log Z e ângulo de -Fase) para 25°C, 35°C e 45°C em diferentes espessuras por laminação a frio.



Fonte: Autoral

É possível observar que com o aumento da frequência, a partir de 2Hz, o módulo de impedância apresenta valores constantes para todos os ensaios. Segundo Li et al., (2015) os valores fornecidos na faixa de alta frequência estão relacionados a resistência à polarização (RP) do material. Tendo conhecimento sobre esse valor, é possível relacionar a taxa de corrosão com essa resistência, sendo assim, quanto maior o valor RP, menor será a taxa de corrosão (MENG e LIU, 2018). Para a frequência de 6mHz, o módulo de impedância apresentou uma redução com o aumento da temperatura do eletrólito, Tabela 6, conforme demonstrado nas Figuras 22, 23, 24 e 25, implicando em uma diminuição da resistência à corrosão.

Tabela 6 – Média dos valores da resistência à polarização (RP) obtidos através do módulo de impedância da frequência de 6mHz, para a liga como recebida - CR e laminadas 30, 50 e 70% de redução em solução 0,01 M de NaCl a diferentes valores de temperatura.

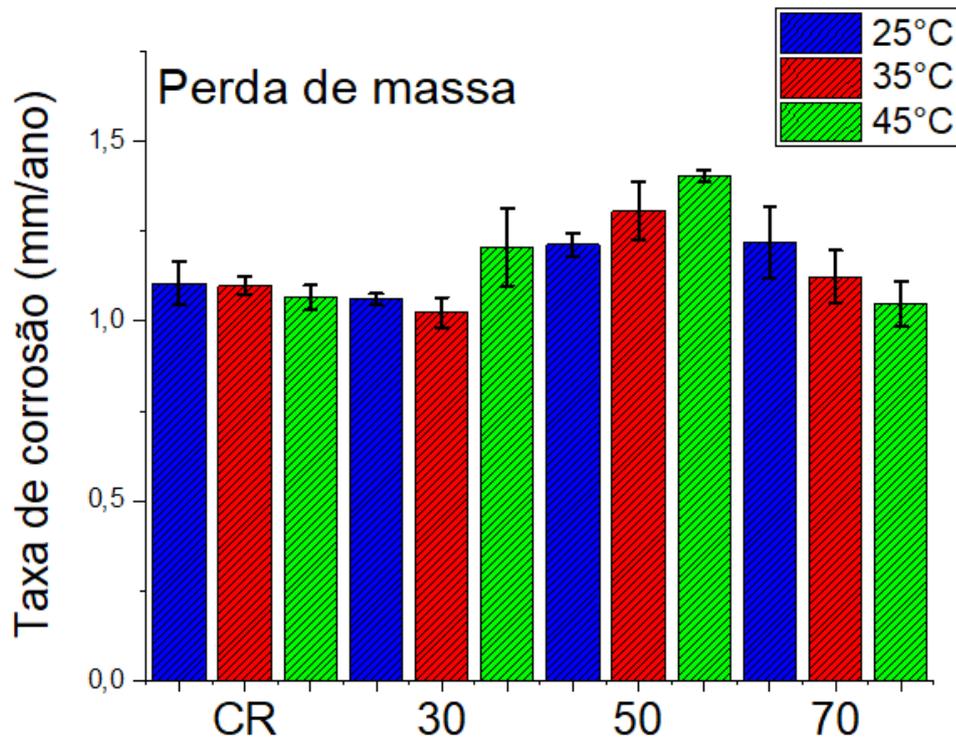
%	25°C	35°C	45°C
0-CR	2456,42 ± 107,77	1840,49 ± 235,97	806,00 ± 113,52
30	1516,03 ± 132,77	1246,31 ± 147,51	783,29 ± 206,89
50	2237,12 ± 261,11	1246,77 ± 485,33	777,68 ± 53,08
70	2025,66 ± 393,23	1134,59 ± 268,05	960,83 ± 219,06

Fonte: Autoral

6.6. Perda de massa

No ensaio de perda de massa houve dois parâmetros a serem observados, sendo eles, o efeito da laminação a frio e o efeito da temperatura na taxa de corrosão, tais resultados estão exibidos na Figura 27.

Figura 27 – Média e desvio padrão da taxa de corrosão do Aço alto Mn obtida por perda de massa.



Fonte: Autoral

Ao analisar o impacto da laminação a frio nas amostras a 25°C, observa-se uma semelhança nos resultados obtidos nos ensaios eletroquímicos. No ensaio de perda de massa, as amostras submetidas à imersão por 24 horas em uma solução de 0,01M de NaCl apresentaram

taxas de corrosão comparáveis. Para o material como recebido, a média da taxa de corrosão foi de 1,1055, com um desvio padrão de 0,0618. Já para o material com 30% de redução por laminação a frio, a média da taxa de corrosão foi de 1,0670, com um desvio de 0,0164. Para a redução de 50%, a taxa foi de 1,2124, com desvio padrão de 0,0306, enquanto a de 70% de redução apresentou um valor de 1,2190, com desvio de 0,0999.

De acordo com a equação de Arrhenius, foi visto que a taxa de corrosão pode aumentar com o incremento da temperatura, já que esse aumento pode acelerar a difusão das espécies envolvidas nas reações eletroquímicas presentes no sistema. Entretanto, esse fenômeno não foi consistente para todas as laminações do aço 26Mn. Notou-se que o material como recebido não manifestou variações na taxa de corrosão com o aumento da temperatura. No caso de 30% de laminação a frio, a partir de 45°C, houve um aumento na taxa de corrosão; para 50% de redução, observou-se um aumento proporcional à elevação da temperatura, enquanto, com 70%, o material apresentou uma redução na taxa de corrosão com o aumento da temperatura. Essas distintas características podem ser explicadas pelos parâmetros empregados, tais como tempo, concentração de cloreto no meio e reações envolvidas no sistema. A salinidade do meio e temperatura, como também velocidade da reação, podem influenciar na quantidade de oxigênio dissolvido que determina a taxa de reação catódica (MELCHERS e CHERNOV, 2010).

Estudos realizados por Peng e Zeng, (2015) verificaram o efeito da temperatura em ensaio de imersão para dutos, onde foi observado uma variação. Conforme aumentava a temperatura, a taxa de corrosão aumentou continuamente, devido a quantidade de filmes e produtos de corrosão baixos e instáveis, sugerindo que o efeito de proteção foi insignificante, já em temperaturas acima de 65°C houve uma estabilidade nos filmes de produtos de corrosão, diminuindo assim a taxa de corrosão.

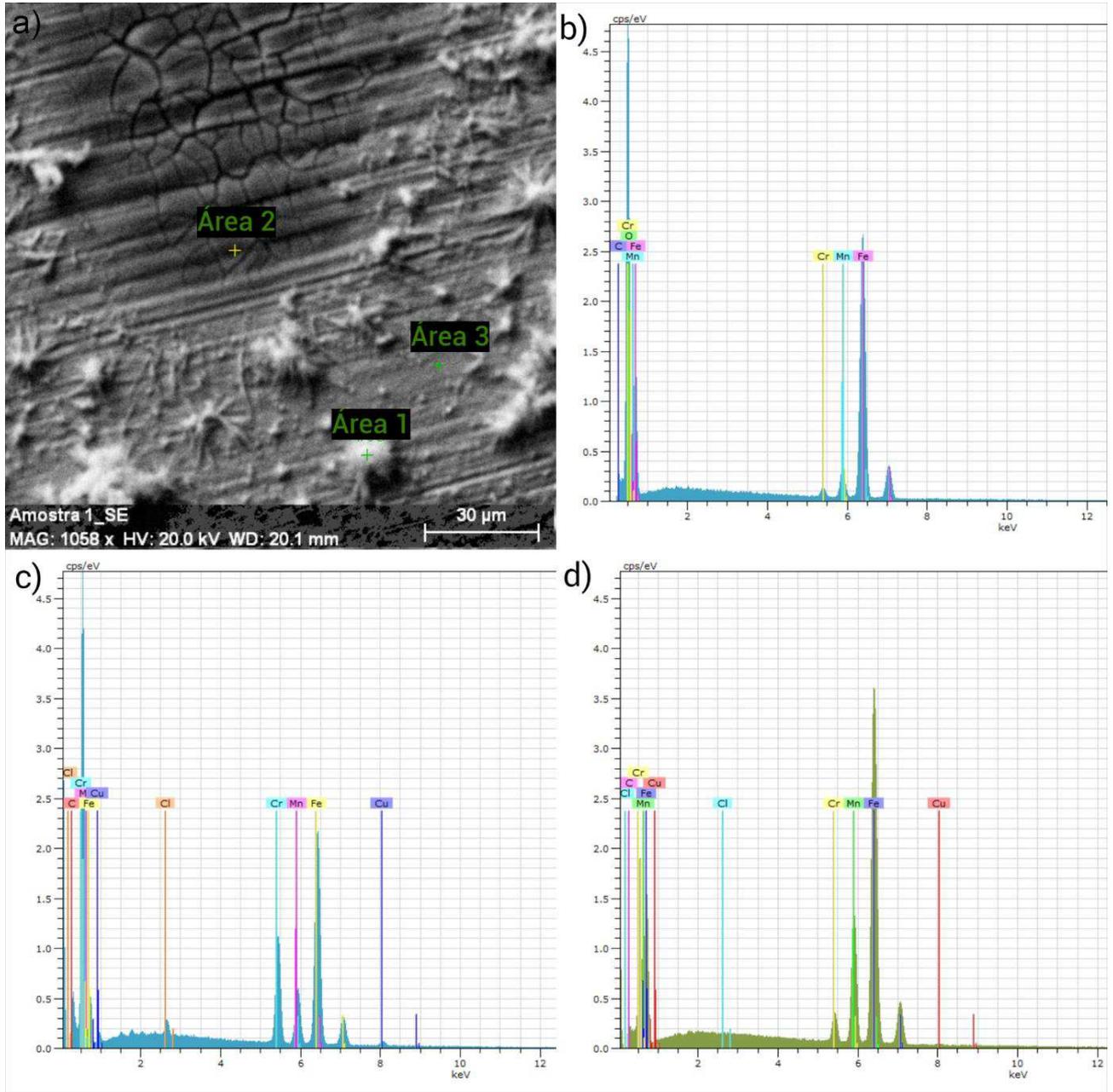
Toloei, Atashin e Pakshir, 2013 analisaram um aço carbono 1045 explorando diferentes parâmetros da água do mar, como pH, temperatura, agitação do meio e salinidade. Observou-se que o efeito da temperatura resultou em uma diminuição da taxa de corrosão conforme a temperatura aumentava, especialmente acima de 40°C. Esse fenômeno foi justificado pela redução da concentração de oxigênio na solução, impactando na diminuição da taxa de reações catódicas do meio e, conseqüentemente, afetando a taxa de corrosão global. Além disso, uma superfície mais lisa e limpa propiciou a formação de uma camada compacta

de produtos de corrosão, inibindo as reações entre o meio e a superfície e retardando o processo corrosivo.

Para uma compreensão mais precisa sobre o que ocorre na superfície do material em um ensaio de imersão, foi realizado o teste de EDS. Após 24 horas em uma solução de NaCl 0,01M, o material foi submetido à análise por MEV para delinear áreas a serem posteriormente analisadas por EDS, com o objetivo de identificar os elementos presentes na superfície das amostras após o processo de corrosão. As análises foram conduzidas tanto no material como recebido (CR) quanto nos laminados, com reduções de espessura de 50% e 70%, em temperaturas de 25°C e 45°C.

A Figura 28 (a) apresenta uma imagem observada por MEV na qual foi identificada diferentes pontos afetados. A área 1 exibe um pequeno depósito de produto acumulado, a área 2 mostra rachaduras e a área 3 representa a parte lisa do material, semelhante a superfície antes de ter sido imergida. Através da análise por EDS, representada nas Figuras 28 (b), (c) e (d), foi possível identificar os elementos presentes em cada ponto (1, 2 e 3, respectivamente) por meio dos espectros elementares. A Tabela 7 registra os valores quantitativos de cada elemento. Os principais elementos encontrados foram manganês, ferro, cromo, cobre e oxigênio. A área 1 apresentou maiores teores de ferro e oxigênio, indicando a presença de óxidos formados após a exposição do material ao processo de corrosão. A área 2 revelou uma maior quantidade de precipitados, com aumento do teor de cromo e ausência de oxigênio. Por último, a área 3 apresentou um percentual de elementos semelhante à composição do material como recebido.

Figura 28 – a) Imagem da superfície do material como recebido a 25°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS.



Fonte: Autoral

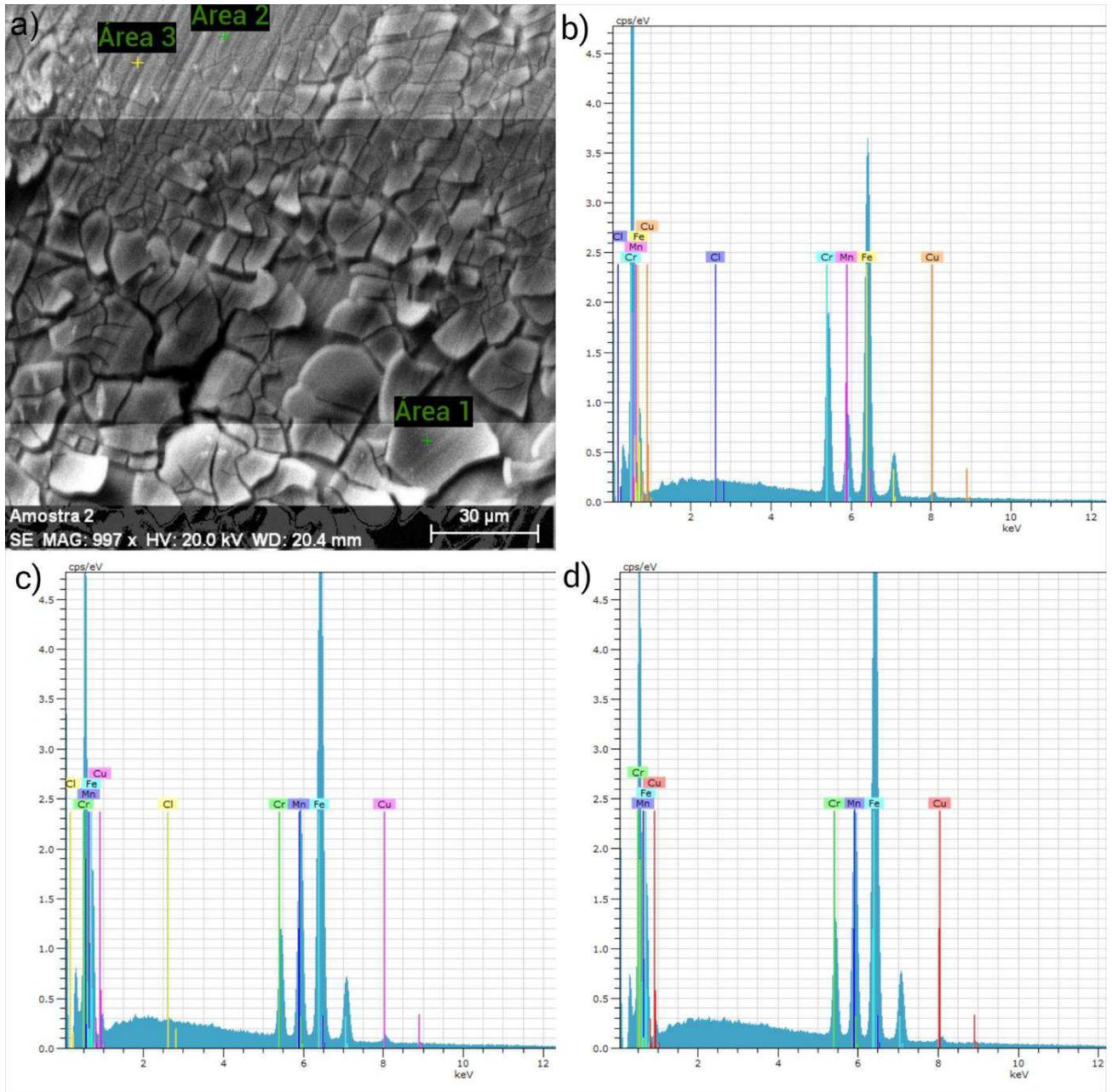
Tabela 7 – Elementos presentes após análise de EDS do material como recebido (0% de redução de espessura por laminação a frio) a 25°C.

Elementos (Concentração. Norm. wt.%)	Área 1	Área 2	Área 3
Manganês	4,77	10,79	21,81
Ferro	60,20	66,23	73,84
Cromo	1,00	19,61	3,40
Cobre	-	3,37	0,95
Oxigênio	34,03	-	-

Fonte: Autoral

A Figura 29 (a) apresenta o material como recebido após um ensaio de imersão com aumento da temperatura do eletrólito para 45°C. Como descrito na figura anterior, foram delimitadas três áreas, cujos espectros estão representados nas Figuras 29 (b), (c) e (d), e seus valores estão detalhados na Tabela 8. Na área 1, entre as rachaduras houve a formação de escamas e nessa parte o material mostrou uma concentração maior do elemento cromo e uma diminuição do manganês em comparação com os valores da composição do aço em estudo. Por outro lado, nas áreas 2 e 3, com superfície mais lisa, o material exibiu valores de manganês dentro do esperado pela composição original. É importante destacar que as três áreas não demonstraram a presença de oxigênio, conforme visto nos estudos anteriores conduzidos por Kim, Kim e Kim (2018), os quais indicavam que tanto o cromo quanto o manganês contribuem para a formação de uma ferrugem mais protetora, retardando a penetração de espécies corrosivas como o oxigênio.

Figura 29 – a) Imagem da superfície do material como recebido a 45°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS.



Fonte: Autoral

Tabela 8 – Elementos presentes após análise de EDS do material como recebido (0% de redução de espessura por laminação a frio) a 45°C.

Elementos (C. Norm. wt. %)	Área 1	Área 2	Área 3
Manganês	9,63	25,12	23,66
Ferro	67,36	65,04	66,52
Cromo	20,78	8,11	7,89
Cobre	2,23	1,73	1,92

Fonte: Autoral

A Figura 30 (a) exhibe o material com uma redução de 50% por laminação a frio após um ensaio de imersão realizado em temperatura ambiente de 25°C. Na Figura 30 (b), a área 1, com superfície mais lisa, revelou resultados semelhantes aos das imagens anteriores, com o material apresentando alto teor de manganês, evidenciado por picos no espectro. Na Figura 30 (c), a área 2 já exibiu a presença de oxigênio e uma diminuição no teor de manganês nesse ponto da superfície. Por fim, a Figura 30 (d), representando a área 3, mostrou um aumento nos picos de cromo e oxigênio, indicando a presença de ambos os elementos. Os valores correspondentes estão detalhados na Tabela 9.

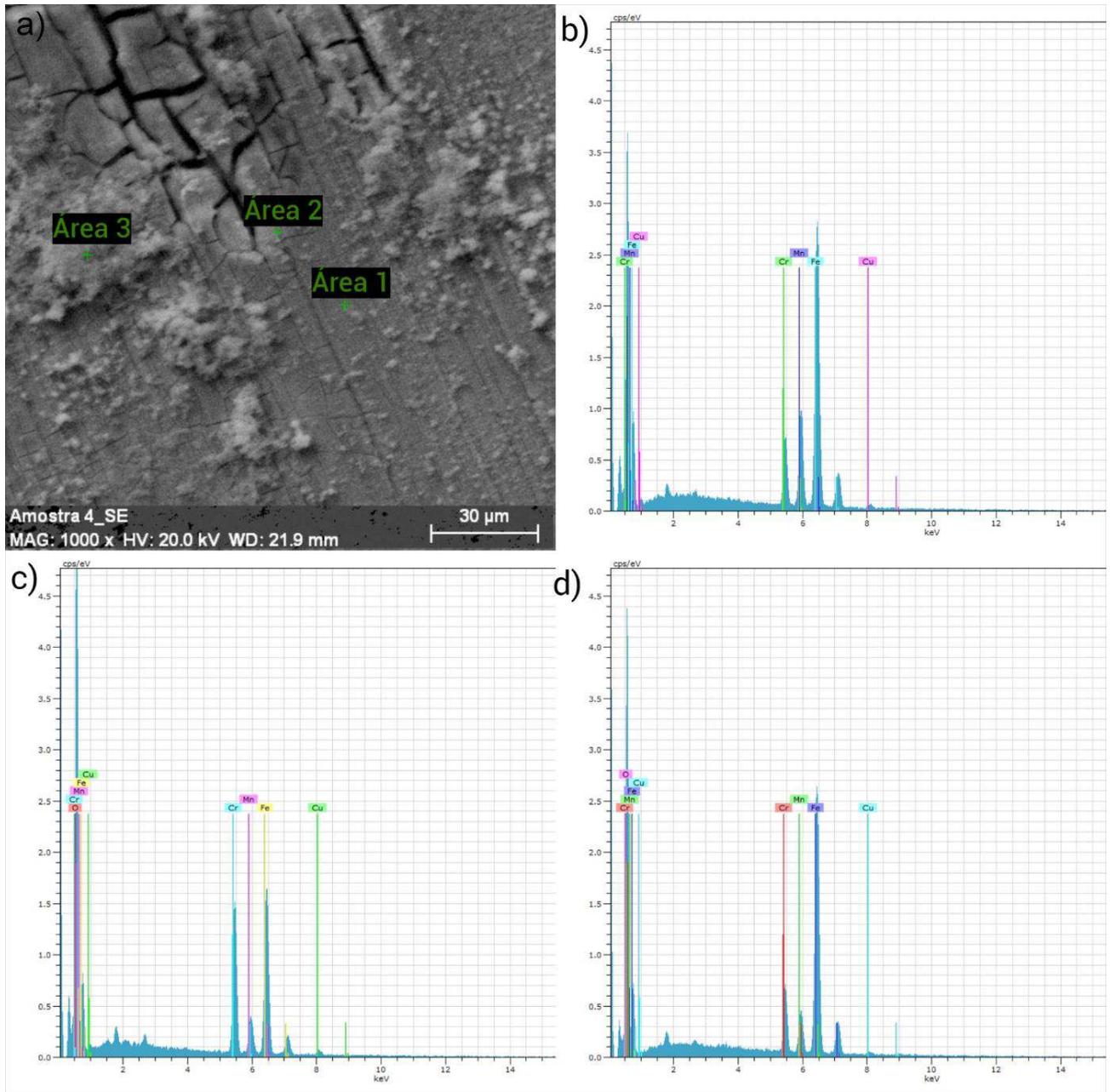
Tabela 9 – Elementos presentes após análise de EDS do material com 50% de redução de espessura por laminação a frio a 25°C.

Elementos (C. Norm. wt. %)	Área 1	Área 2	Área 3
Manganês	20,71	7,72	1,40
Ferro	72,25	75,44	64,67
Cromo	6,04	2,39	20,43
Cobre	1,00	0,72	1,59
Oxigênio	-	13,73	11,91

Fonte: Autoral

A Figura 31 (a) exibe o material com uma redução de 50% por laminação a frio após um ensaio de imersão realizado em temperatura ambiente de 45°C. Na Figura 31 (b), a área 1, semelhante aos resultados anteriores, a superfície menos afetada pelo processo de corrosão apresentou picos altos de manganês e na Figura 31 (c), a área 2 próximo a rachadura apresentou picos indicando alto teor de cromo e baixo teor de manganês. Figura 31 (d), representando a área 3, mostrou um aumento nos picos de oxigênio, indicando um substrato formado por óxido de ferro. Os valores correspondentes estão detalhados na Tabela 10.

Figura 31 – a) Imagem da superfície do material com 50% de redução por laminação a frio a 45°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS



Fonte: Autoral

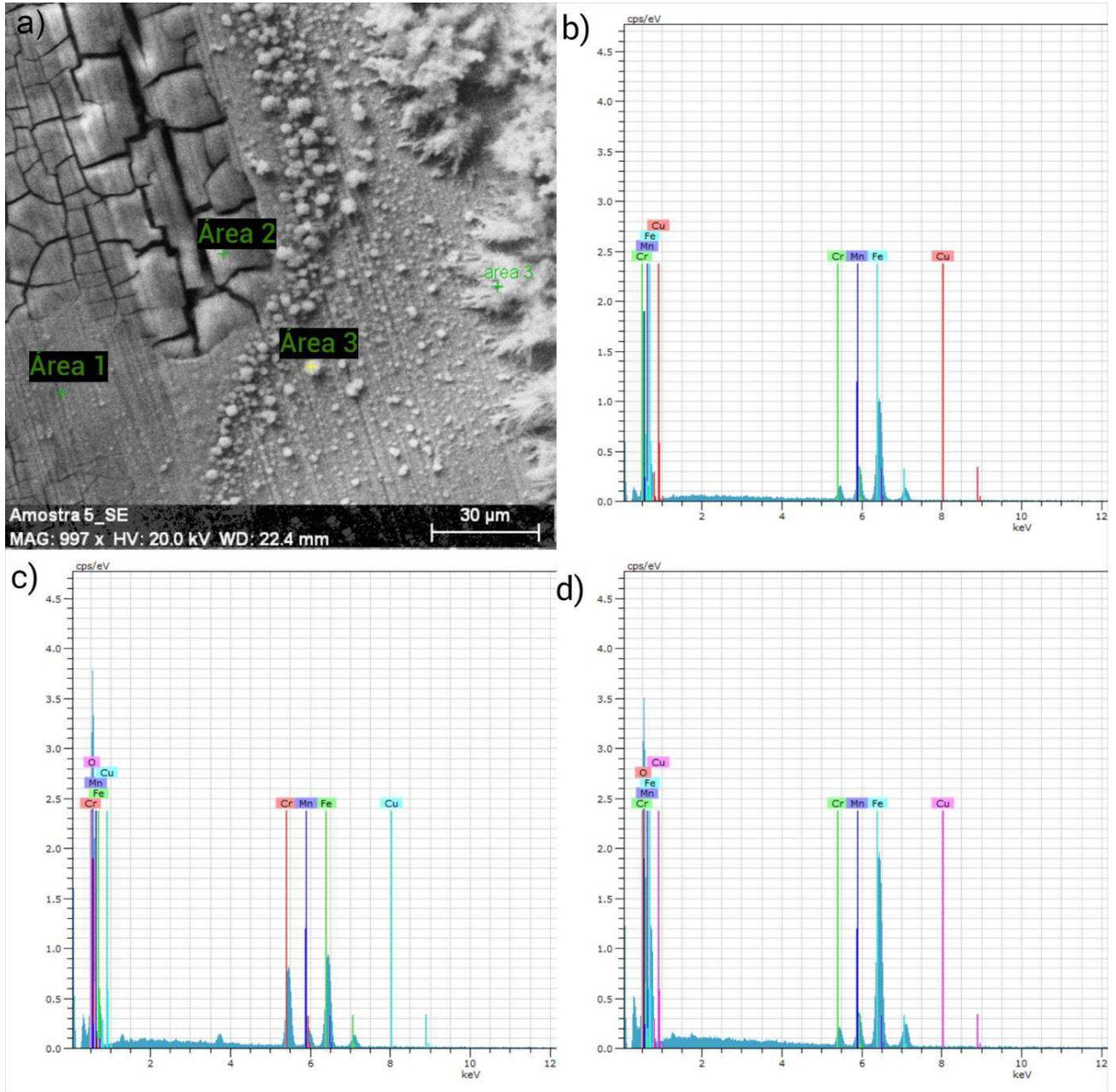
Tabela 10 – Elementos presentes após análise de EDS do material com 50% de redução de espessura por laminação a frio a 45°C.

Elementos (C. Norm. wt. %)	Área 1	Área 2	Área 3
Manganês	20,82	4,49	8,20
Ferro	67,37	44,56	63,53
Cromo	9,98	25,19	9,06
Cobre	1,83	3,33	2,62
Oxigênio	-	22,43	16,59

Fonte: Autoral

A Figura 32 (a) exibe o material com uma redução de 70% por laminação a frio após um ensaio de imersão em eletrólito com temperatura de 25°C. Observado a Figura 32 (b), (c) e (d) e a Tabela 11 a área 1 apresentou alto teor de manganês em uma área menos degradada, podendo ser um indicativo que o manganês inibe que o oxigênio penetre essa área formando óxidos, como observado na área 3 a formação de óxido de ferro. A área 2, conforme resultados anteriores apresentou alto teor de cromo próximo as lamelas.

Figura 32 – a) Imagem da superfície do material com 70% de redução por laminação a frio a 25°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS



Fonte: Autoral

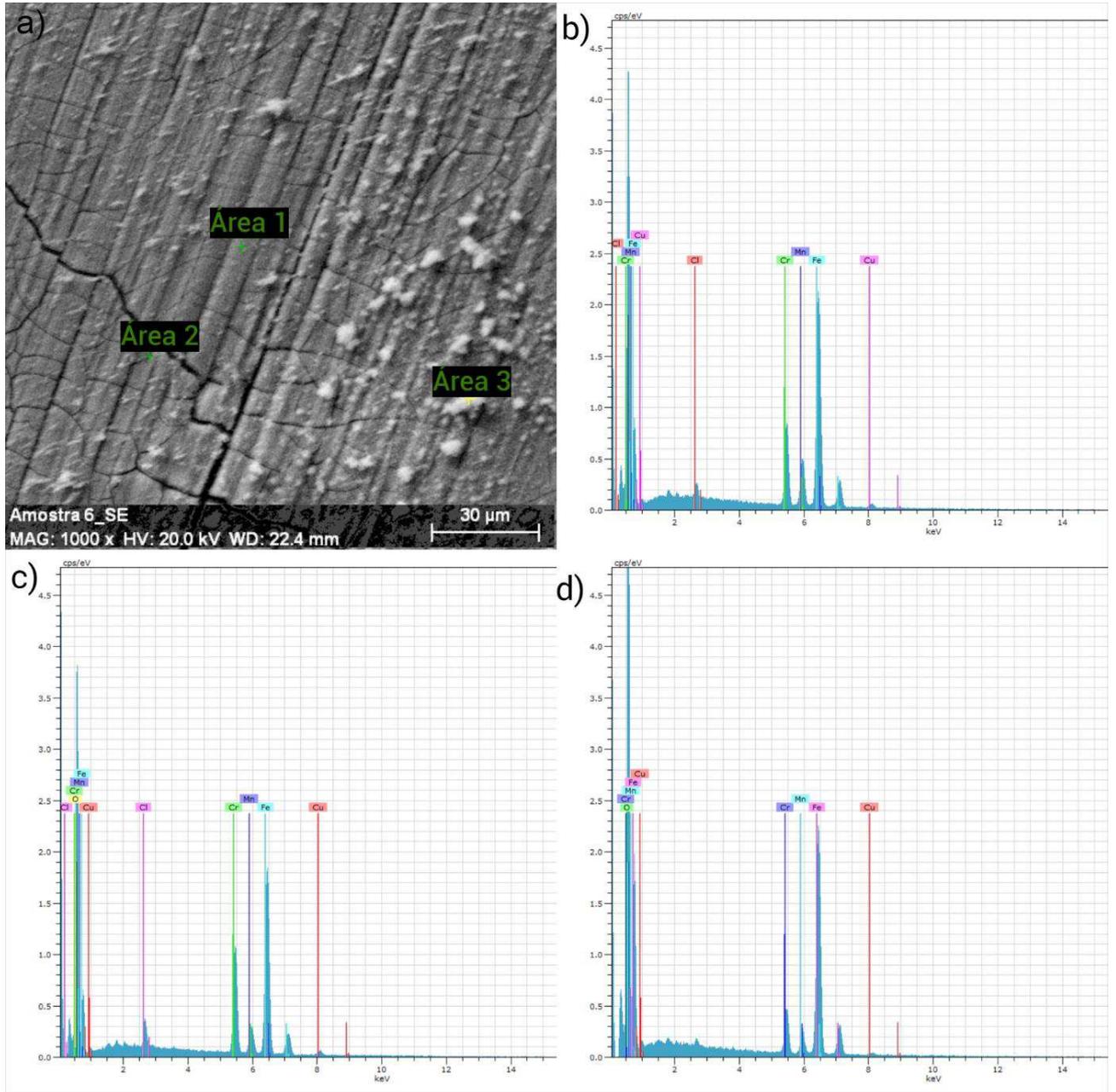
Tabela 11 – Elementos presentes após análise de EDS do material com 70% de redução de espessura por laminação a frio a 25°C.

Elementos (C. Norm. wt. %)	Área 1	Área 2	Área 3
Manganês	21,99	2,65	9,82
Ferro	70,47	47,33	66,45
Cromo	6,05	24,94	3,29
Cobre	1,49	2,12	1,59
Oxigênio	-	22,91	18,86

Fonte: Autoral

A Figura 33 (a) exhibe o material submetido a uma redução de 70% por laminação a frio, após um ensaio de imersão em eletrólito a 45°C. Na área 1 (Figura 33-b), foram observados picos de enriquecimento de manganês e cromo, próximos à camada rachada de produtos de corrosão na superfície da amostra, permitindo a exposição do metal à solução eletrolítica, conforme relatado por Florez *et al.*, 2019. Na área 2 (Figura 33-c), houve uma redução de manganês e um aumento no enriquecimento de cromo, juntamente com a presença de oxigênio, especialmente próximos às rachaduras. Na área 3 (Figura 33-d), foi observada uma diminuição dos elementos de liga e um aumento na formação de óxidos de ferro. Os valores correspondentes estão detalhados na Tabela 12.

Figura 33 – a) Imagem da superfície do material com 70% de redução por laminação a frio a 45°C, observada por MEV com aumento de 1000x; em b), c) e d) apresentam as frações dos elementos presentes nas áreas analisadas 1, 2 e 3, respectivamente, registradas através do EDS



Fonte: Autoral

Tabela 12 – Elementos presentes após análise de EDS do material com 70% de redução de espessura por laminação a frio a 45°C.

Elementos (C. Norm. wt. %)	Área 1	Área 2	Área 3
Manganês	11,73	4,16	4,06
Ferro	69,14	58,75	65,27
Cromo	16,08	20,61	6,91
Cobre	3,22	3,39	1,53
Oxigênio	-	13,09	22,23

Fonte: Autoral

Em todos os resultados obtidos, foi notável uma presença baixa do teor de cobre, com exceção da área 1 da Figura 28, onde nesse ponto houve um aumento na espessura da camada de óxido de ferro. O teor de cromo demonstrou aumento nas áreas próximas às lamelas. Conforme indicado pelo estudo de Yan *et al.* (2021), o aumento do Cr sugere que a presença desse elemento fortalece a resistência à corrosão da camada de ferrugem de manganês, contribuindo para um equilíbrio no processo corrosivo. Além disso, a fase rica em manganês, principalmente nas áreas onde se observa marcas de lixamento, devido ao processo realizado antes dos ensaios, é propensa a perder elétrons facilmente, promovendo a dissolução do Mn e acelerando assim o processo de corrosão. Segundo Florez *et al.*, 2019, afirma que o aumento de manganês na composição do material resulta na saída de íons de Mn^{+2} que aumenta a sensibilidade à corrosão.

7. CONCLUSÃO

- A laminação a frio provocou variações na microestrutura do material à medida que a espessura diminuía, resultando no aumento da quantidade de maclas mecânicas no material. A partir de uma redução de 30%, a microdureza do material aumentou quase 100% em comparação como recebido. Reduções de 50% e 70% na laminação contribuíram ainda mais para o aumento da microdureza do material.
- A preparação superficial por lixamento, comumente empregada antes dos ensaios eletroquímicos, não exerce influência na microdureza do material. Assim, essa forma de preparação pode ser mantida para analisar o efeito da laminação a frio na resistência à corrosão.
- O monitoramento do potencial de Corrosão (OCP) estabilizou-se em 1800 segundos. À medida que a temperatura do eletrólito aumentou, o sistema foi para valores mais nobres devido as reações catódicas predominantes no sistema.
- As curvas de polarização potenciodinâmica linear mostraram um aumento na densidade de corrente à medida que a temperatura aumentou, enquanto o efeito da laminação a frio não apresentou uma diferença significativa. O potencial de corrosão deslocou-se para valores mais positivos, sugerindo que houve uma redução na solubilidade do oxigênio na solução.
- A partir da extrapolação anódica de Tafel, foram obtidos valores de I_{corr} associados à taxa de corrosão. Assim como os outros resultados, a laminação a frio não demonstrou influência, enquanto o efeito da temperatura, especialmente a partir de 45°C, resultou em aumento do I_{corr} .
- As imagens de Microscopia Ótica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), obtidas após a polarização, revelaram corrosão generalizada.
- A partir da espectroscopia de impedância eletroquímica foi obtido a Resistência à Polarização (RP), mostrando uma considerável diminuição a partir de 35°C, indicando forte influência da temperatura na cinética dos processos corrosivos.
- A taxa de corrosão, obtida pela perda de massa, apresentou aumento a partir de 45°C para os laminados com redução de 30% e 50%. No entanto, em 70% de redução de espessura, observou-se uma redução da taxa de corrosão.
- A análise de EDS, após imersão em 0,01M de NaCl, apresentou um comportamento semelhante para todas as condições trabalhadas (sem processo de laminação a frio, com 50% e 70% de redução de espessura e temperaturas de 25°C e 45°C). Os principais

elementos presentes são o Fe, Mn, Cr e Cu. Elemento como o cromo ajudou a estabilizar os óxidos formados, mas o efeito da tendência de dissolução do material é favorecido, como é observado nas rachaduras formadas nessas áreas.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ARK, I.-J.; LEE, S.-M.; KANG, M.; LEE, S.; LEE, Y.-K. Pitting corrosion behavior in advanced high strength steels. *Journal of Alloys and Compounds*. [S. l.]: **Elsevier BV**, 2015.

ASM Handbook Metallography and Microstructures, v. 15, p. 701-708, 2004.

ASTM E407-07, **Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM G31-72, **Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals**; ASTM International, 1995.

BARBUCCI, A.; DELUCCHI, M.; PANIZZA, M.; SACCO, M.; CERISOLA, G. Electrochemical and corrosion behaviour of cold rolled AISI 301 in 1 M H₂SO₄. *Journal of Alloys and Compounds*. [S. l.]: **Elsevier BV**, abr. 2001.

BHADESHIA, H. K. D. H; HONEYCOMBE, R. W. K.; *Steels—Microstructure and Properties*. **Elsevier**, 3rd ed. Burlington: 2006

BOUAZIZ, O., ALLAIN, S., SCOTT, C. P., CUGY, P., BARBIER, D. High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships. **Current opinion in solid state and materials science**, v. 15, n. 4, p. 141-168, 2011.

CALPHAD, 2015. Calphad. Available at: <http://www.calphad.com/ironmanganese.html>.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, v. 8^o Edição. Rio de Janeiro, 2012.

CARVALHO, L. A.; ANDRADE, A. R.; BUENO, P. R. Espectroscopia de impedância eletroquímica aplicada ao estudo das reações heterogêneas em ânodos dimensionalmente estáveis. **Química Nova**, v. 29, p. 796-804, 2006.

COOMAN, B. C.; ESTRIN, Y.; KIM, S. K. Twinning-induced plasticity (TWIP) steels. **Acta Materialia**, v. 142, p. 283-362, 2018.

DAVID, E. Materials for cryogenics applications. **International Scientific Conference Achievements in Mechanical and Materials Engineering**, p. 191– 198, 2003.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Ministério de Minas e Energia. Sumário Mineral. Disponível em <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/manganes>>. Acesso em: 22 de Novembro de 2023.

DOWLING, N. E., Mechanical Behavior of Materials, Prentice Hall International Inc., **Englewood Cliffs**, New Jersey, 1993.

FAJARDO, S.; LLORENTE, I.; JIMÉNEZ, J.; BASTIDAS, J. M.; BASTIDAS; D. M.. Effect of Mn additions on the corrosion behaviour of TWIP Fe-Mn-Al-Si austenitic steel in chloride solution. **Corrosion Science**, v. 154, p. 246-253, 2019.

FLOREZ, M. A. C; LIMA, M. N da S.; ARAÚJO, W. S.; SILVA, M. J. G. da. Characterization and Comparative Analysis of Corrosion Resistance of 4 High Manganese Steels Models in Aqueous Solution of NaCl. **Materials Research**. [S. 1]: FapUNIFESP (SciELO), 2019.

FROMMEYER, G.; BRÜX, U.; NEUMANN, P. Supra-Ductile and High-Strength Manganese-TRIP/TWIP Steels for High Energy Absorption Purposes. **ISIJ International**. [S. 1.]: Iron and Steel Institute of Japan, 2003.

GRAJCAR, A.; KOŁODZIEJ, S.; KRUKIEWICZ, W. Corrosion resistance of high-manganese austenitic steels. **Archives of Materials Science and Engineering**, v. 41, n. 2, p. 77-84, 2010.

GRÄSSEL, O.; KRÜGER, L.; FROMMEYER, G.; MEYER, L. W. High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels development — properties — application. **International Journal of Plasticity**. [S. 1.]: Elsevier BV, 2000.

HASSAN, B., ABDUL KADER, H., e ABDUL-JABBAR, M. Experimental study on carbon steel corrosion and its inhibition using sodium benzoate under different operating conditions. **Iraqi journal of chemical and petroleum engineering**, v.12, n. 3, p. 11-24, 2011.

HUSSEIN, S. S., AI, N., e HASAN, B. O. Corrosion of carbon steel in flowing Sulfuric acid. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v. 6 n.1, 2016.

HIROMOTO, S. Corrosion of metallic biomaterials. In: *Metals for Biomedical Devices*. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 131–152.

JIMENÉZ, Y. S.; GIL, M. T.; GUERRA, M. T.; BALTES, L. S.; ROSCA, J. C. M.. Interpretation of open circuit potencial of two titanium alloys for a long time immersion in physiological fluid. **Bulletin of the Transilvania University of Brasov**. Vol 2. Brasov, 2009.

JONES, D. A. **Principles and prevention of corrosion**. 2 ed. Pearson. EUA. 1992.

KANNAN, M. B., RAMAN, R. S., KHODDAM, S. e LIYANAARACHCHI, S. Corrosion behavior of twinning-induced plasticity (TWIP) steel. **Materials and corrosion**, v. 64, n. 3, p. 231-235, 2013.

KIM, B.; KIM, S.; KIM.. Effects of alloying elements (Cr, Mn) on corrosion properties of the high-strength steel in 3.5% NaCl solution. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, p. 1-13, 2018.

KOYAMA, M.; AKIYAMA, E.; LEE, Y.-K.; RAABE, D.; TSUZAKI, K. Overview of hydrogen embrittlement in high-Mn steels. *International Journal of Hydrogen Energy*. [S. l.]: Elsevier BV, abr. 2017.

LEE, Y.-K.; HAN, J. Current opinion in medium manganese steel. **Materials Science and Technology**, v. 31, n. 7, p. 843-856, 2015.

LIMA, G. R. **Influência dos elementos de liga no encruamento proveniente do processo de usinagem nos aços Hadfield**, em III Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Unesp. Bauru, São Paulo. 2009.

LIMA, M. N. da S. et al. Influence of cold deformation on microstructure, crystallographic orientation and tensile properties of an experimental austenitic Fe–26Mn-0.4 C steel. **Journal of materials research and technology**, v. 19, p. 7-19, 2022.

LIMA, M. N. da S.. **Microestrutura, corrosão e propriedades mecânicas de um aço de alto teor de manganês (27%p) para aplicações criogênicas**. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.

LUO, H.; WANG, X.; DONG, C.; XIAO, K.; LI, X. Effect of cold deformation on the corrosion behaviour of UNS S31803 duplex stainless steel in simulated concrete pore solution. *Corrosion Science*. [S. l.]: **Elsevier BV**, ago. 2017

MA, G.; WU, G.; SHI, W.; XIANG, S.; CHEN, Q.; MAO, X. Effect of cold rolling on the corrosion behavior of Ta-4W alloy in sulphuric acid. *Corrosion Science*. [S. l.]: Elsevier BV, nov. 2020.

MAZANCOVÁ, E. **High Manganese Materials. In: Materials for Extreme Technical Applications**. [s.l.] Department Of Materials Engineering - Technical University of Ostrava, 2007. p. 21.

MELCHERS R E., CHERNOV B. Corrosion loss of mild steel in high temperature hard freshwater. *Corrosion Science*; v. 52, p. 449–454, 2010.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behavior of Materials**. 2^a ed. Cambridge, United States. Cambridge University Press, 2009.

MOHAMMED, F. S.; YAHYA, S. E. A. A.; ELRAMADY, A. G. Effect of Temperature and Concentration of Ammonium Nitrate Solution on the Susceptibility of Mild Steel to Stress Corrosion Cracking. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. [S. l.]: **Scientific Research Publishing, Inc.**, 2010.

NETO, A. R. F.; FUKUGAUCHI, C. S. e DOS SANTOS PEREIRA, M. Indústria Automotiva: Aços Avançados de Alta Resistência–Revisão. *Revista Sinergia*, v. 21, n. 1, 2020.

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

PEGUET, L.; MALKI, B.; BAROUX, B. Influence of cold working on the pitting corrosion resistance of stainless steels. *Corrosion Science*. [S. l.]: Elsevier BV, abr. 2007.

PENG, S.; ZENG, Z. An experimental study on the internal corrosion of a subsea multiphase pipeline. *Petroleum*, v. 1, n. 1, p. 75-81, 2015.

PODANY, P., GREGOR, T., STUDECKY, T. e DONIK, C. High Manganese TWIP Steel with Increased Corrosion Resistance. *Metals*, v. 12, n. 10, p. 1765, 2022.

QUEIROZ, C. H. B. **Estudo da influência do pH do eletrólito no comportamento eletroquímico das ligas UNS S41003 E ENDUR 300**. Dissertação – Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, n.84, 2021.

TOLOEI, A.; ATASHIN, S.; PAKSHIR, M. Corrosion rate of carbon steel under synergistic effect of seawater parameters including pH, temperature, and salinity in turbulent condition. **Corrosion Reviews**, v. 31, n. 3-6, p. 135-144, 2013.

SCHUMANN, VH (1972). **Neue Hütte**, v. 17, p. 605-609. 1972.

SILVA, A. L., MEI, P. R., **Aços e Ligas Especiais**, 2. ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2006.

SMITH, R.W.; DEMONTE, A.; MACKAY, W.B.F. Development of high-manganese steels for heavy duty cast-to-shape applications. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 589 – 595, 2004.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. Vol. 49. Edusp, 2003.

Yan, X., Yan, L., Kang, S., Qi, X., Xu, M., e Zhang, P. Corrosion behavior and electrochemical corrosion of a high manganese steel in simulated marine splash zone. **Materials Research Express**, v. 8, n. 12, p. 126507, 2021.

YANUSHKEVICH, Z.; BELYAKOV, A.; KAIBYSHEV, R.; HAASE, C.; MOLODOV, D. A. Effect of cold rolling on recrystallization and tensile behavior of a high-Mn steel. **Materials Characterization**. [S. l.]: Elsevier BV, fev. 2016.

XIA, D.-H.; DENG, C.-M.; MACDONALD, D.; JAMALI, S.; MILLS, D.; LUO, J.-L.; STREBL, M. G.; AMIRI, M.; JIN, W.; SONG, S.; HU, W. Electrochemical measurements used for assessment of corrosion and protection of metallic materials in the field: A critical review. **Journal of Materials Science & Technology**. [S. l.]: Elsevier BV, 2022.