

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO MUNIZ DE FREITAS

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA ETILENODIAMINA COMO INIBIDOR DE
CORROSÃO NA DECAPAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

LONDRINA

2023

LEONARDO MUNIZ DE FREITAS

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA ETILENODIAMINA COMO INIBIDOR DE
CORROSÃO NA DECAPAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

**Evaluation of the efficiency of ethylenediamine as a corrosion inhibitor in the
pickling of AISI 304 stainless steel**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Cleberson Cipriano de Paula

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LEONARDO MUNIZ DE FREITAS

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA ETILENODIAMINA COMO INIBIDOR DE
CORROSÃO NA DECAPAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 27/junho/2023

Prof^a. Dr^a. Sílvia Midori Higa
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof. Dr. Cleberson Cipriano de Paula
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

LONDRINA

2023

Dedico este trabalho a Deus e à minha mãe, que sempre esteve ao meu lado e me apoiou, apesar da distância.

AGRADECIMENTOS

Gostaria, primeiramente, de agradecer a Deus, pela oportunidade de chegar a este momento com paz no coração. Também sou grato a Lucimar Muniz de Oliveira por ser uma mãe incrível, que lutou de todas as formas para me dar os apoios necessários para trilhar este caminho.

Agradeço ao professor orientador, Dr. Cleberson Cipriano de Paula, que esteve ao meu lado com suporte técnico e sempre à disposição para tirar dúvidas, compartilhando conhecimento e amizade durante essa trajetória.

Também expresso minha gratidão à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina, pela valiosa oportunidade de aprendizado e pelo privilégio de conhecer amigos ao longo desses anos.

E, por fim, agradeço ao Gestor de laboratório da Welding, Eng. Rodolfo Peticarrari, pelo fornecimento dos materiais e equipamentos para a realização deste trabalho.

RESUMO

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem alta resistência à corrosão em meios oxidantes. Essa característica ocorre devido à capacidade desse material formar espontaneamente uma camada passiva em virtude da presença do cromo em sua liga. Ainda que possua essa capacidade de resistir a corrosão, existe a possibilidade de ocorrer a corrosão localizada, por pite ou frestas, em decorrência dos processos de acabamento do material. O presente trabalho enfoca no uso de uma solução de etilenodiamina como inibidor de corrosão, no processo de decapagem química em solução de ácido clorídrico. Para a avaliação da eficiência do inibidor são propostos ensaio gravimétrico e análise das superfícies expostas através da análise visual e microscópica. Com base nas análises realizadas e nos resultados obtidos, comprovou-se a eficácia do inibidor na solução decapante, em termos de taxa de corrosão e o aspecto superficial após a decapagem.

Palavras-chave: aço inoxidável AISI 304; inibidor de corrosão; decapagem química; etilenodiamina.

ABSTRACT

The austenitic stainless steels have high corrosion resistance in oxidizing environments. This characteristic is due to their ability to spontaneously form a passive layer due to the presence of chromium in their alloy. Despite this corrosion-resistant capability, there is a possibility of localized corrosion, such as pitting or crevices, resulting from finishing processes on the material. The present study focuses on the use of an ethylenediamine solution as a corrosion inhibitor in the chemical pickling process with hydrochloric acid solution. To evaluate the inhibitor's efficiency, gravimetric tests and analysis of the exposed surfaces through visual and microscopic examination are proposed. Based on the conducted analyses and the obtained results, the inhibitor's effectiveness in the pickling solution was proven in terms of corrosion rate and the surface aspect after pickling.

Keywords: AISI 304 stainless steel, corrosion inhibitor, chemical pickling, ethylenediamine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de Schaeffler para aços inoxidáveis.....	16
Figura 2 – Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico	17
Figura 3 – Representação da camada passiva no aço inoxidável	18
Figura 4 – Relação da espessura do filme passivo em diferentes meios e materiais.....	19
Figura 5 – Representação dos tipos mais frequentes de corrosão em aços austeníticos	20
Figura 6 – Representação esquemática da corrosão por pite.....	21
Figura 7 – Representação esquemática da corrosão por pite.....	22
Figura 8 – Diagrama de polarização: ação de inibidor anódico	24
Figura 9 – Diagrama de polarização: ação de inibidor catódico	25
Figura 10 – Estrutura química da etilenodiamina.....	26
Figura 11 – Amostra de chapa após decapagem em laboratório.....	27
Figura 12 – Micrografia da superfície do aço inoxidável 304, após remoção de óxidos.....	29
Figura 13 – Amostras de chapas de aço inoxidável austenítico 304	31
Figura 14 – Fluxograma das atividades realizadas	32
Figura 15 – Espectrômetro SpectroMax utilizado para análise química dos cupons	33
Figura 16 – Aparato e insumos utilizados no ataque eletrolítico	34
Figura 17 – Microscópio Óptico Nikon Optiphot	34
Figura 18 – Cupons obtidos a partir das amostras em chapas.....	35
Figura 19 – Procedimento para realização da imersão da solução de decapagem	36
Figura 20 – MEV JEOL JSM-6610LV da USP de Ribeirão Preto	37
Figura 21 – Estereoscópio Nikon Optiphot	37
Figura 22 – Micrografias das amostras obtidas por MO	39
Figura 23 – Resultados da taxa de corrosão média dos cupons (eixo primário) e a eficiência do inibidor de corrosão (eixo secundário)	42
Figura 24 – Cupons imersos nas soluções de decapagem	43
Figura 25 – Imagens obtidas pelo estereoscópio dos cupons após a decapagem	44
Figura 26 – Diferença da coloração na superfície lixada dos cupons	45
Figura 27 – Micrografias da superfície dos cupons obtida no MEV	46
Figura 28 – Micrografias dos cupons, obtidas por MO, na superfície de fabricação das chapas, em cada solução obtidas com aumento de 100x	47
Figura 29 – Micrografias do cupom utilizado na solução 1	48
Figura 30 – Micrografias demonstrando a presença de pite raso (400x)	49
Figura 31 – Superfície lixada dos cupons (200x).....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química AISI 304.....	17
Tabela 2 - Composição química da amostra utilizada para estudo	38
Tabela 3 - Dimensões dos cupons utilizados em cada solução decapante.....	40
Tabela 4 – Resultados de taxa de corrosão e eficiência do inibidor em diferentes concentrações	40
Tabela 5 – Resultados de taxa de corrosão e eficiência do inibidor em diferentes concentrações	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C_{req}	Cromo equivalente
EDA	Etilenodiamina
E_f	Eficiência do inibidor de corrosão
Ni_{eq}	Níquel equivalente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscópio Óptico
T_c	Taxa de corrosão com o uso do inibidor de corrosão
T_s	Taxa de corrosão com a ausência do inibidor de corrosão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivo específico	13
3	JUSTIFICATIVA	14
4	REFERENCIAL TEÓRICO	15
4.1	Aço inoxidável	15
4.1.1	Aços inoxidáveis austeníticos.....	16
<u>4.1.1.1</u>	<u>Aço inoxidável AISI 304</u>	<u>16</u>
4.2	Passivação	17
4.3	Corrosão em materiais metálicos	19
4.3.1	Corrosão em aços inoxidáveis.....	20
<u>4.3.1.1</u>	<u>Corrosão por pite</u>	<u>20</u>
4.4	Inibidores de corrosão	22
4.4.1	Classificação dos inibidores	23
<u>4.4.1.1</u>	<u>Inibidores anódicos</u>	<u>23</u>
<u>4.4.1.2</u>	<u>Inibidores catódicos</u>	<u>24</u>
<u>4.4.1.3</u>	<u>Inibidores de adsorção</u>	<u>25</u>
4.4.2	Eficiência dos inibidores de corrosão	26
4.5	Decapagem química	26
4.5.1	Ácido clorídrico	28
<u>4.5.1.1</u>	<u>Uso do HCl como decapante</u>	<u>28</u>
4.6	Técnica de avaliação da eficiência de inibidores de corrosão	29
4.6.1	Técnica gravimétrica.....	29
5	MATERIAIS E MÉTODOS	31
5.1	Materiais	31
5.2	Método	31
5.2.1	Caracterização das amostras	32
<u>5.2.1.1</u>	<u>Caracterização química</u>	<u>32</u>
<u>5.2.1.2</u>	<u>Caracterização microestrutural</u>	<u>33</u>
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
6.1	Caracterização química e microestrutural	38
6.2	Decapagem química	40

6.3	Análise das superfícies antes e após o ensaio de imersão	42
7	CONCLUSÃO	50
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é o ataque químico ou eletroquímico que se inicia na superfície de um material, na maioria das vezes, gera consequências indesejadas, que interferem na segurança de projetos e gera custos de manutenção.

Os aços inoxidáveis surgiram para aplicação em meios que se desejava resistência à corrosão e seu desempenho se altera de acordo com os elementos de liga presentes.

A capacidade de resistir à corrosão é devido à formação espontânea de uma camada passiva formada pela presença do cromo, que é favorecida em meio oxidantes. Essa camada protege a superfície metálica contra os ataques corrosivos.

Apesar dessa característica, pode-se identificar algumas exceções devido às corrosões localizadas, geradas de acordo com acabamento do artefato, ou seja, como o material se encontra após os processamentos.

Para a preparação de uma superfície metálica, pode-se utilizar entre outros, o tratamento de decapagem química, que removerá contaminantes metálicos presentes na superfície.

Uma melhor eficiência deste processo se dá pelo o uso de inibidores de corrosão, uma vez que seu uso reduz o ataque dos ácidos utilizados na decapagem, melhorando assim a aderência da camada passiva, devido o melhor acabamento da superfície do aço decapado. Os inibidores são classificados de acordo com sua composição e o seu comportamento, e podem retardar a reação do ânodo ou no cátodo, ou ainda funcionar como uma película protetora.

Os inibidores de adsorção são compostos orgânicos, sendo amplamente conhecidos com o grupo funcional amino. Seu uso como inibidor de corrosão é altamente dependente do ambiente corrosivo.

A partir disso, este trabalho propõe a avaliação da eficiência do uso de etilenodiamina como inibidor de corrosão no processo de decapagem química com ácido clorídrico no aço inoxidável austenítico, visando ser uma alternativa para reduzir o processo corrosivo nesse material.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Este presente trabalho possui como objetivo geral avaliar a eficiência da etilenodiamina como inibidor de corrosão no processo de decapagem na solução de ácido clorídrico como decapante do aço inoxidável austenítico AISI 304.

2.2 Objetivo específico

- Avaliar a decapagem química no aço inoxidável austenítico AISI 304 em função da taxa de corrosão e da análise das superfícies dos cupons;
- Determinar a taxa de corrosão dos cupons decapados em soluções de ácido clorídrico, tanto com a utilização de etilenodiamina, quanto na sua ausência, a fim de comparar os resultados obtidos;
- Avaliar e discutir a eficiência do inibidor de corrosão em duas concentrações diferentes na solução decapante;
- Analisar as superfícies dos cupons por meio da microscopia eletrônica de varredura antes e após a decapagem.

3 JUSTIFICATIVA

Os aços inoxidáveis austeníticos desempenham um papel fundamental em diversas aplicações devido às suas propriedades de resistência à corrosão e estabilidade estrutural.

No entanto, durante o processo de fabricação e manuseio, impurezas indesejadas podem se acumular na superfície desses materiais, comprometendo sua capacidade de resistir à corrosão. O uso da decapagem química visa eliminar as impurezas acumuladas na superfície do material, resultantes de processos como soldagem, conformação ou contaminação durante o manuseio.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o uso da solução de etilenodiamina como inibidor de corrosão em um processo de decapagem com ácido clorídrico.

Ao empregar concentrações adequadas dessa solução, espera-se alcançar eficiência e controle de corrosão nos aços inoxidáveis austeníticos, restaurando a integridade de sua superfície e melhorando sua resistência à corrosão.

Além disso, a utilização do ácido clorídrico em combinação com a etilenodiamina oferece uma alternativa viável e mais segura em relação a ácidos mais corrosivos, como o ácido sulfúrico e o ácido fluorídrico, levando em consideração restrições de acesso e questões ambientais.

Ressalta-se que o uso em concentrações inadequadas ou insuficientes pode resultar na corrosão excessiva da superfície do material. Portanto, um controle adequado e uma análise precisa são necessários para garantir a eficácia do processo de decapagem.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Aço inoxidável

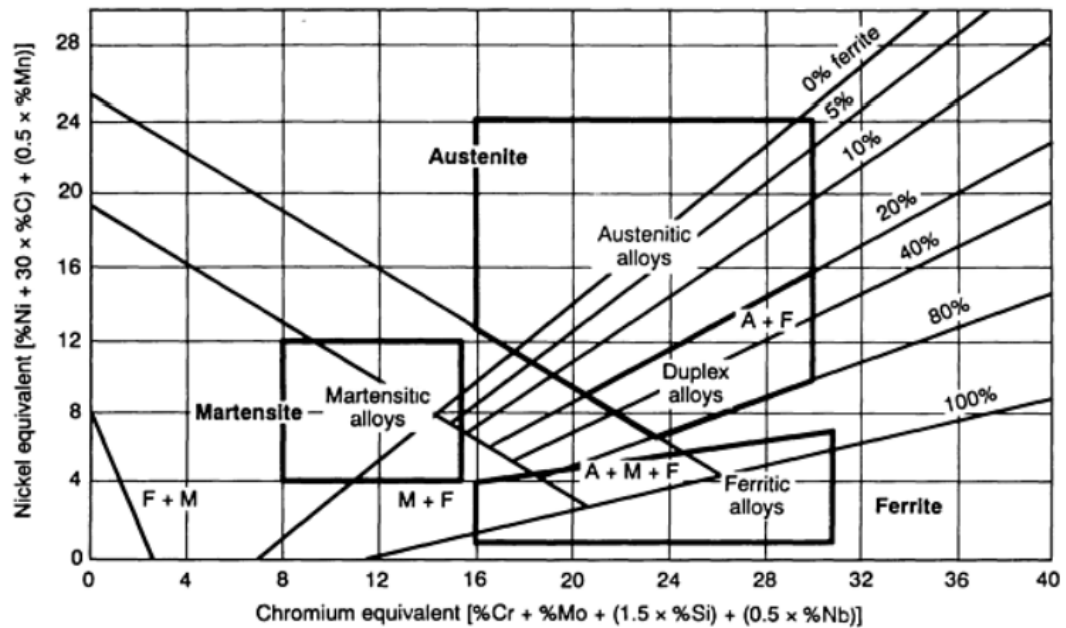
Os aços inoxidáveis são altamente resistentes a corrosão, especialmente na temperatura ambiente, devido ao seu elemento de liga predominante que é o cromo (Cr). Pelo menos 10,5% de Cr na liga é necessário para que não ocorra corrosão atmosférica. A resistência à corrosão pode ainda ser melhorada pela adição de níquel (Ni) e molibdênio (Mo) (CALLISTER, 2020; CARBÓ, 2008).

Embora possua classificações mais completas, o aço inoxidável pode ser classificado em ferríticos (que apresentam uma porcentagem de Cr mais alto e de Fe mais baixa), martensíticos (predominam o Cr mais baixo e Fe mais alto, com adição de carbono) e os austeníticos (constituído basicamente por Fe-Cr-Ni) (CARBÓ, 2008).

Os martensíticos são uma fase rica em carbono que permite a transformação de ferrita em austenita em altas temperaturas, e durante o resfriamento a austenita se transforma em martensita. Os ferríticos contém um teor maior de cromo comparado aos martensíticos, desenvolvendo assim uma melhor resistência a corrosão, porém com decréscimo na resistência ao impacto. Os austeníticos possuem a adição do níquel como elemento de liga que permite transformar a estrutura ferrítica em austenita e conseqüentemente uma grande mudança em propriedades (CARBÓ, 2008).

Para a obtenção de microestrutura e propriedades específicas nesses materiais, requer a adição de diversos elementos de ligas aos sistemas fundamentais de Fe-Cr, Fe-Cr-C e Fe-Cr-Ni, tais como manganês (Mn), silício (Si), molibdênio (Mo), nióbio (Nb), titânio (Ti) e nitrogênio (N). Para compreender de maneira abrangente o efeito da composição na microestrutura nos diferentes tipos de aços inoxidáveis, utiliza-se o conceito de cromo e níquel equivalentes (Cr_{eq} e Ni_{eq}). A representação gráfica da relação entre a composição e microestrutura ficou conhecido como Diagrama de Schaeffler e pode ser visualizado na Figura 1 (ASM INTERNATIONAL, 1995; SCHAEFFLER, 1949).

Figura 1 – Diagrama de Schaeffler para aços inoxidáveis



Fonte: ASM INTERNATIONAL (1995)

Na composição dos aços inoxidáveis, são os elementos cromo e níquel que se responsabilizam pela formação de um óxido protetor, o que confere resistência à liga metálica em uma ampla variedade de ambientes corrosivos. Porém, há meios de elevada agressividade, como quando há a existência de íons halogenetos (cloretos e fluoretos), que quebram o óxido formado na superfície e promovem a corrosão (CHIAVERINI, 2008; GENTIL, 2011; RIVIE, UHLIG, 2008)

4.1.1 Aços inoxidáveis austeníticos

A série AISI 300 possui uma excelente propriedade de resistência a corrosão devido: a) a adição de molibdênio que melhora a resistência a corrosão por pites e frestas; b) redução do teor de carbono ou estabilização com titânio para reduzir a corrosão intergranular de materiais soldados, c) a adição de níquel e cromo para melhorar a resistência a oxidação em temperaturas elevadas e d) adição de níquel para melhorar a resistência de corrosão sob tensão (SEDRICKS, 1979).

4.1.1.1 Aço inoxidável AISI 304

O aço inoxidável austenítico AISI 304 possui densidade de 7,93g/cm³ e composição química de acordo com a Tabela 1 (GENTIL, 2011; GERDAU, 2003).

Tabela 1 - Composição química AISI 304

AISI 304	Composição química (%)						
	C(máx.)	Mn(máx.)	Si(máx.)	P(máx.)	S(máx.)	Cr	Ni
	0,08	2,00	0,75	0,045	0,030	18,00-20,00	8,00-10,50

Fonte: Gerdau (2003)

O AISI 304 é usualmente submetido a tratamento térmico de solubilização à 1050°C, seguido de resfriamento em água, para dissolver carbonetos nocivos à resistência a corrosão (COLPAERT, 2008). Na Figura 2 é apresentada uma microestrutura típica do material.

Figura 2 – Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico



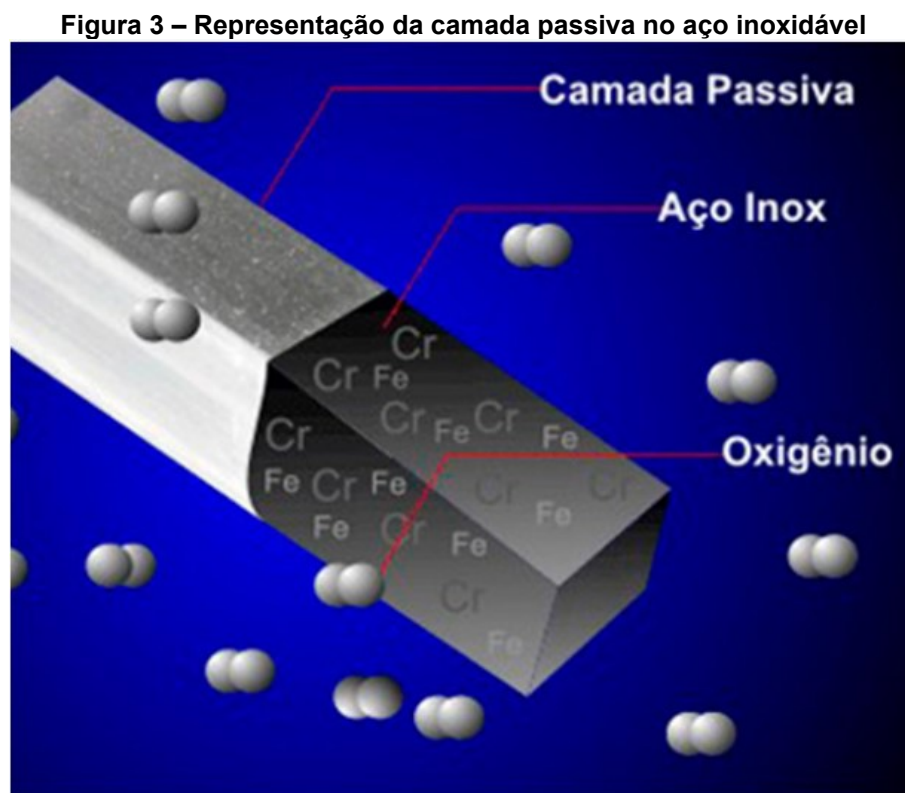
Fonte: Colpaert (2008)

4.2 Passivação

O processo de passivação depende do material e do meio. Alguns metais e ligas, com cromo, níquel, molibdênio e aços inoxidáveis se passivam ao ar. Esse processo melhora a resistência a corrosão e pode ser obtida por oxidação, por meio

de substâncias como ácido nítrico e oxigênio do ar, ou por polarização anódica. Assim, o Fe, Ni, Cr, Mo, W, Al e suas ligas são passivados (GENTIL, 2011).

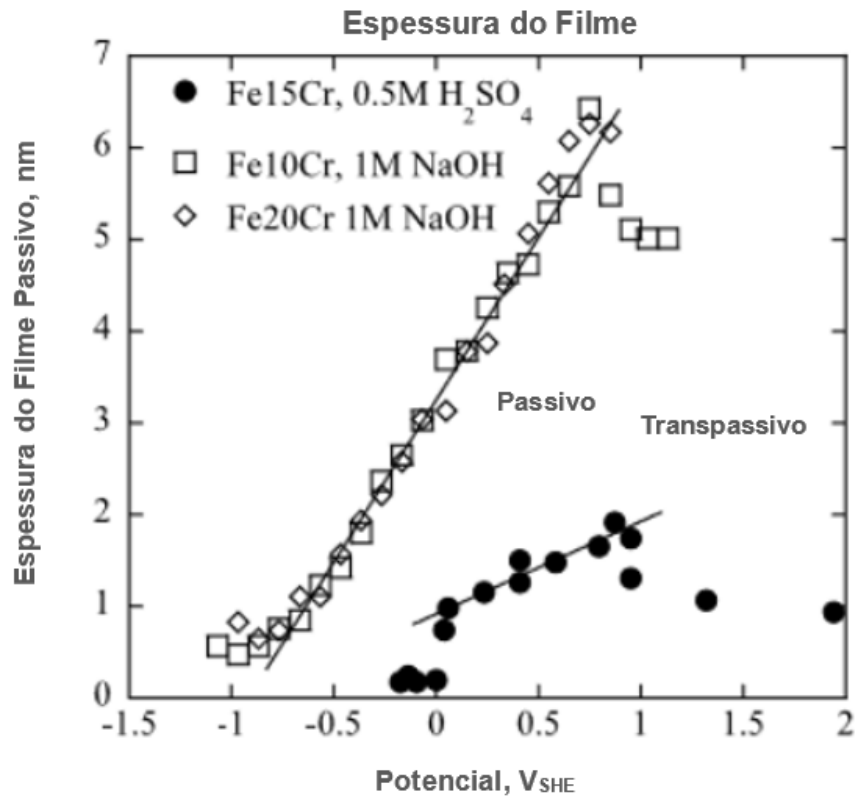
Os metais que constituem os aços inoxidáveis reagem com bastante facilidade, principalmente o Cr, que possibilita a formação de filmes que protegem essas ligas de ataques de corrosão. Assim, determina-se o fenômeno de passividade, uma vez que o metal ou a liga deixam de ser corroídos, quando termodinamicamente deveria esperar-se o contrário (CARBÓ, 2008). A Figura 3 representa a camada passiva em um aço inoxidável.



Fonte: AÇOPLANO (2018)

Os filmes passivos nos aços inoxidáveis, normalmente, são encontrados em espessura aproximada de 3nm a 5nm. Entretanto, a natureza do filme passivo é complexa e altamente dependente do ambiente em que se encontra. Na Figura 4 é mostrado um gráfico com a relação entre a espessura do filme passivo, potencial e pH em diferentes tipos de aço inoxidável (CARBÓ, 2008; OLSON E LANDOLT, 2003; LYNCH, 2022).

Figura 4 – Relação da espessura do filme passivo em diferentes meios e materiais



Fonte: Adaptado de Olson e Landot (2003)

4.3 Corrosão em materiais metálicos

A corrosão em metais possui como definição o ataque destrutivo não intencional, o qual é um ataque eletroquímico que se inicia normalmente na superfície do material e possui consequências que são comuns no dia a dia, por exemplo, a ferrugem. Também há a corrosão intencional, como os procedimentos de ataque químico, que fazem uso da reatividade química seletiva dos contornos dos grãos ou dos vários constituintes microestruturais (CALLISTER, 2020).

O processo de corrosão em materiais metálicos consiste em uma reação química em que há uma transferência de elétrons de uma espécie para outra. A característica da capacidade do metal de ceder elétrons para o meio é conhecido como uma reação de oxidação, conforme demonstrado na equação 1 em uma reação genérica de um metal hipotético (M) (CALLISTER, 2020).

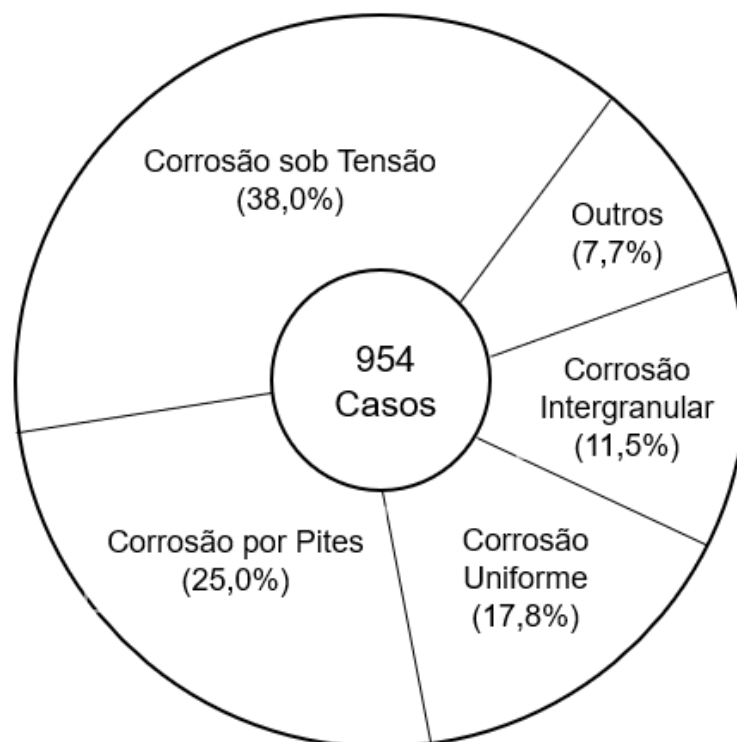


4.3.1 Corrosão em aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis possuem a capacidade de promover uma camada de óxido protetor em sua superfície que impede a corrosão. Todavia, a presença de íons de cloreto (Cl⁻) pode levar a efeitos que prejudicam a passividade e viabilizam surgimento de pites quando os íons cloreto atingem a interface do metal (FAJARDO et al., 2014).

Segundo Carbó (2008, p.41) “O mesmo aço inoxidável, em um determinado meio, pode se comportar de diferentes maneiras em função do acabamento que foi dado ao mesmo”. Com isso pode-se observar na Figura 5 os tipos mais frequentes de corrosão em aços austeníticos.

Figura 5 – Representação dos tipos mais frequentes de corrosão em aços austeníticos



Fonte: Padilha e Guedes (1994)

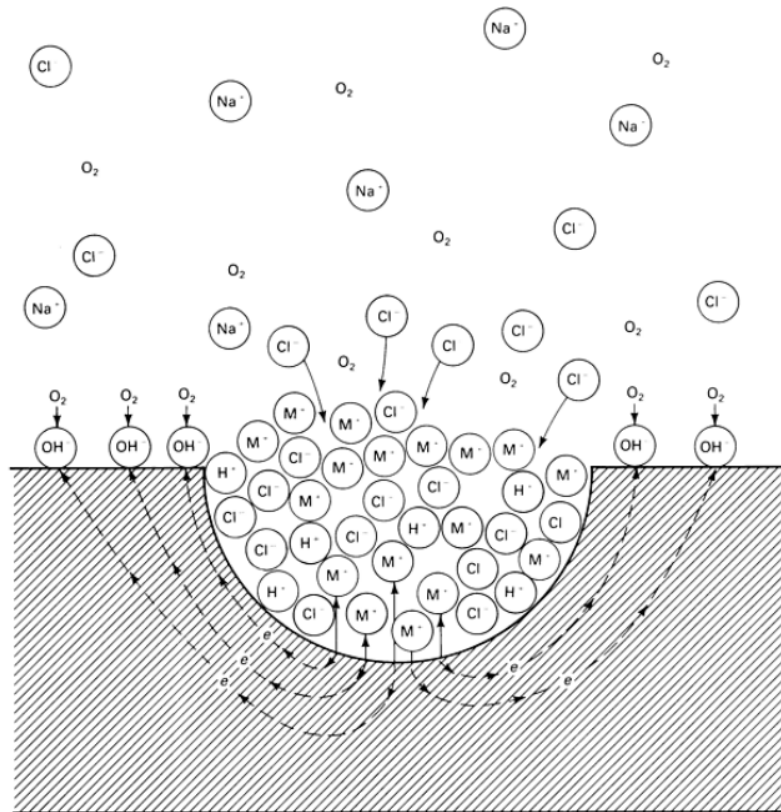
4.3.1.1 Corrosão por pite

A corrosão por pite é caracterizada por pequenas cavidades (pites) localizadas na superfície do metal, que são angulosas e de profundidade maior que seu diâmetro. Ela é caracterizada ainda de acordo com a capacidade que o metal possui de se

passivar, que impede a penetração de oxigênio em sua superfície (GENTIL, 2011; SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007).

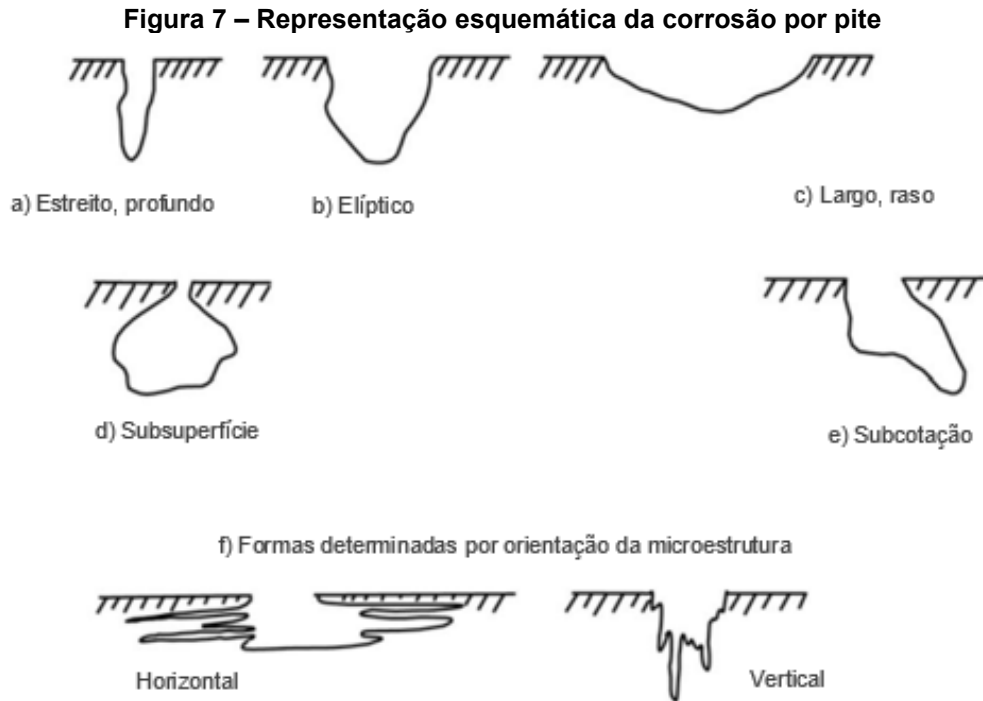
Desta forma, afirma-se que os pites começam pela quebra da passividade em regiões favorecidas na superfície do metal. Após sua formação, os produtos dentro dos pites são responsáveis pela tendência pela corrosão penetrar no metal em vez de se espalhar. Com isso, uma vez iniciados, podem continuar crescendo por um processo autocatalítico. O esquema da corrosão por pite de um metal genérico pode ser observado na Figura 6 (ASM INTERNATIONAL, 1992).

Figura 6 – Representação esquemática da corrosão por pite



Fonte: ASM INTERNATIONAL (1992)

Segundo a norma ASTM G46-21, avaliação da corrosão por pites tem como propósito avaliar o desempenho de ligas em determinadas aplicações, e também em relação ao uso do inibidor de corrosão, com objetivo de avaliar se afetam ou evitam a corrosão por pites. É recomendada avaliação através de Microscopia Óptica, com aumentos de 50x a 500x, para cavidades estreitas. Desta forma, na Figura 7 é apresentada uma representação esquemática da variação dos pites na seção transversal.



Fonte: Adaptado de ASTM G46 (2021)

A importância do estudo da geometria dos pites se dá pela determinação da vida útil de componentes, em que esses pites podem crescer e causar vazamentos. E com isso esse processo é utilizado para prever a vida útil de um material. Uma vez que pites mais largos, crescem preferencialmente na largura, já pites mais profundos, crescem em direção a espessura do material (ASM INTERNATIONAL, 1992; ASTM G46-21; RIBEIRO, et al., 2009).

4.4 Inibidores de corrosão

Os inibidores de corrosão são substâncias ou mistura de substâncias que, quando presente em concentrações adequadas, em um meio corrosivo, reduz ou elimina a corrosão (GENTIL, 2011).

Para a utilização desses inibidores com eficiência, devem-se considerar quatro aspectos descritos a seguir (GENTIL, 2011).

1) Causas das corrosões no sistema:

No intuito de identificar os problemas cuja solução pode ser solucionada pelo uso de inibidores.

2) Custo da utilização:

Para verificar a viabilidade da utilização, leva-se em conta:

- Aumento da vida útil do equipamento;
- Eliminação de paradas não programadas;
- Prevenção de acidentes resultantes de fraturas por corrosão;
- Ausência da contaminação de produtos.

3) Propriedades e os mecanismos de ação dos inibidores a serem usados:

A fim de, verificar a compatibilidade com o processo em operação e com os materiais metálicos utilizados, com objetivo de evitar efeitos secundários prejudiciais.

4) As condições adequadas de adição e controle:

Com intuito de evitar inconveniências, como a formação de espuma em função da agitação do meio e perda de inibidores devido à deficiente solubilidade no meio corrosivo.

4.4.1 Classificação dos inibidores

Em um amplo sentido entende-se como inibidores de corrosão um composto que, adicionado ao meio que se encontra o metal, ou seja, em atmosferas corrosivas, causará uma notável diferença na velocidade de dissolução (GIANNETTI, 1992).

Entre as classificações há as baseadas na composição (inibidores orgânicos e inorgânicos) e no comportamento (inibidores oxidantes, não oxidantes, anódicos, catódicos e de adsorção) (GENTIL, 2011).

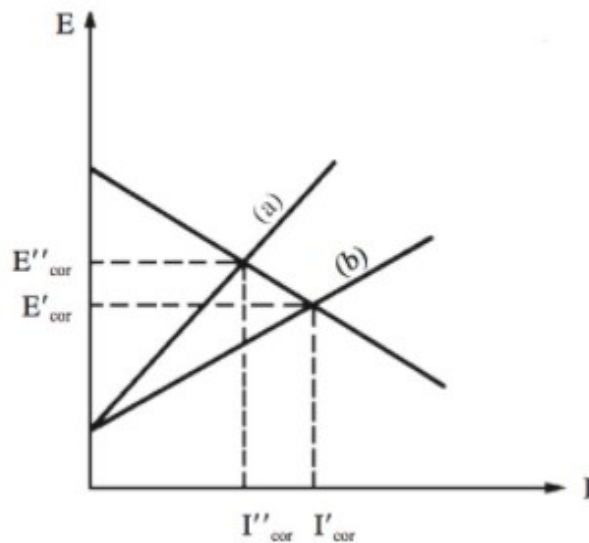
4.4.1.1 Inibidores anódicos

Os inibidores anódicos impedem ou retardam a reação do ânodo. Sua ação se desenvolve pela reação com o produto de corrosão, formando um filme passivo aderente e insolúvel, sob a superfície do metal, ocorrendo a polarização. Para obter uma proteção ideal do metal, necessita-se que a substância usada como inibidor de corrosão seja utilizada em quantidade adequada, uma vez que cada inibidor possui uma concentração crítica na solução acima da qual há inibição. Caso a concentração

do inibidor presente valor abaixo do que a concentração crítica, a camada protetora não se forma por toda a extensão da superfície do material, o que possibilitará corrosão localizada nas áreas desprotegidas (GENTIL, 2011).

Na Figura 8 pode-se observar como os inibidores anódicos deslocam o potencial de corrosão do metal para valores mais positivos.

**Figura 8 – Diagrama de polarização: ação de inibidor anódico
Curva (a) com inibidor e curva (b) sem inibidor**



Fonte: Gentil (2011)

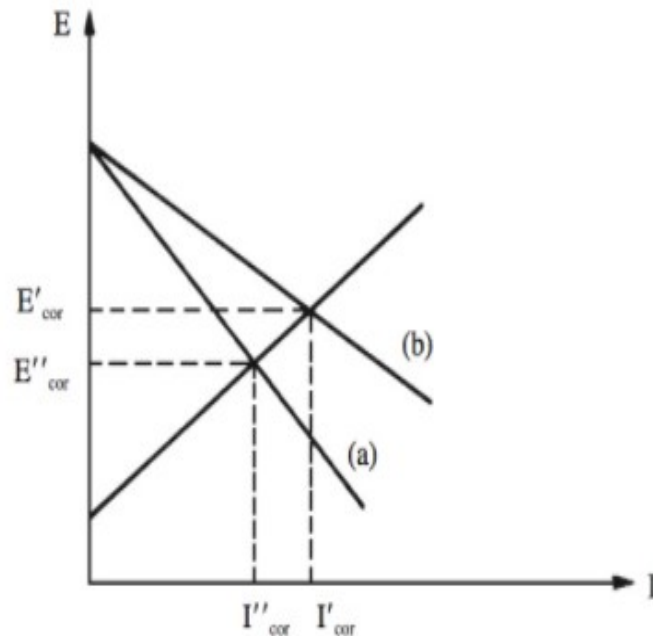
4.4.1.2 Inibidores catódicos

Os inibidores catódicos atuam reprimindo as reações catódicas. Isso se dá devido à capacidade de produzir composto insolúvel e devido à capacidade de reação com a alcalinidade catódica. Esses compostos dão origem a uma película impermeável, que impedirá a difusão do oxigênio e a condução de elétrons, assim ocorre à inibição do processo catódico (GENTIL, 2011).

Os inibidores catódicos atuam pela realização de uma polarização catódica. Como o metal no cátodo não entra em solução e mesmo que não seja totalmente recoberto pela camada protetora, não haverá corrosão localizada nas áreas desprotegidas. Dessa forma, esses inibidores são considerados mais seguros em comparação aos anódicos (GENTIL, 2011).

Na Figura 9 pode-se observar como os inibidores catódicos deslocam o potencial de corrosão para valores mais negativos.

Figura 9 – Diagrama de polarização: ação de inibidor catódico
Curva (a) com inibidor e curva (b) sem inibidor



Fonte: Gentil (2011)

4.4.1.3 Inibidores de adsorção

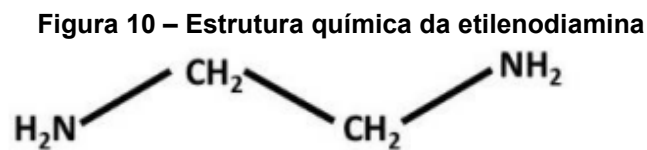
Estes inibidores funcionam como películas protetoras, devido a capacidade de algumas substâncias formarem películas sobre as áreas anódicas e catódicas, a fim de interferir com a ação eletroquímica. Nesse grupo de inibidores incluem substâncias orgânicas com grupo fortemente polares que dão lugar à formação de películas por adsorção (GENTIL, 2011).

Assim, o mecanismo de inibição da corrosão desses compostos depende de variáveis, como a estrutura molecular, do tipo de adsorção, da interferência no processo de corrosão ou no processo de redução ou de ambos, e da formação de um filme adsorvido insolúvel (SANYAL, 1981).

As películas de proteção ocasionadas também são influenciadas pelo processo que estão atuando nos materiais, como a velocidade do fluido, o volume e concentração do inibidor utilizado, temperatura do sistema, tempo de contato do inibidor com a superfície metálica e a composição do fluido no sistema. Isso relaciona

a formação do filme devido a reação do metal, o inibidor e o meio. (GENTIL, 2011; SANYAL, 1981).

Neste grupo estão incluídas as substâncias orgânicas. Com grupos fortemente polares, com átomos de oxigênio, nitrogênio ou enxofre, os aldeídos, ureia e também as aminas (GENTIL, 2011). Na Figura 10 pode-se observar a estrutura química da etilenodiamina como exemplo de inibidor orgânico utilizado.



Fonte: Silva, et al. (2019)

4.4.2 Eficiência dos inibidores de corrosão

É possível calcular a eficiência dos inibidores de corrosão (E_f) a partir da técnica gravimétrica. O cálculo é realizado a partir da taxa de corrosão com a ausência do inibidor (T_s), da taxa de corrosão com o uso do inibidor de corrosão (T_c), conforme a equação 2 (GENTIL, 2011; HOTSUMI; KODAMA, 2011).

$$E_f(\%) = \frac{T_s - T_c}{T_s} \times 100 \quad (2)$$

4.5 Decapagem química

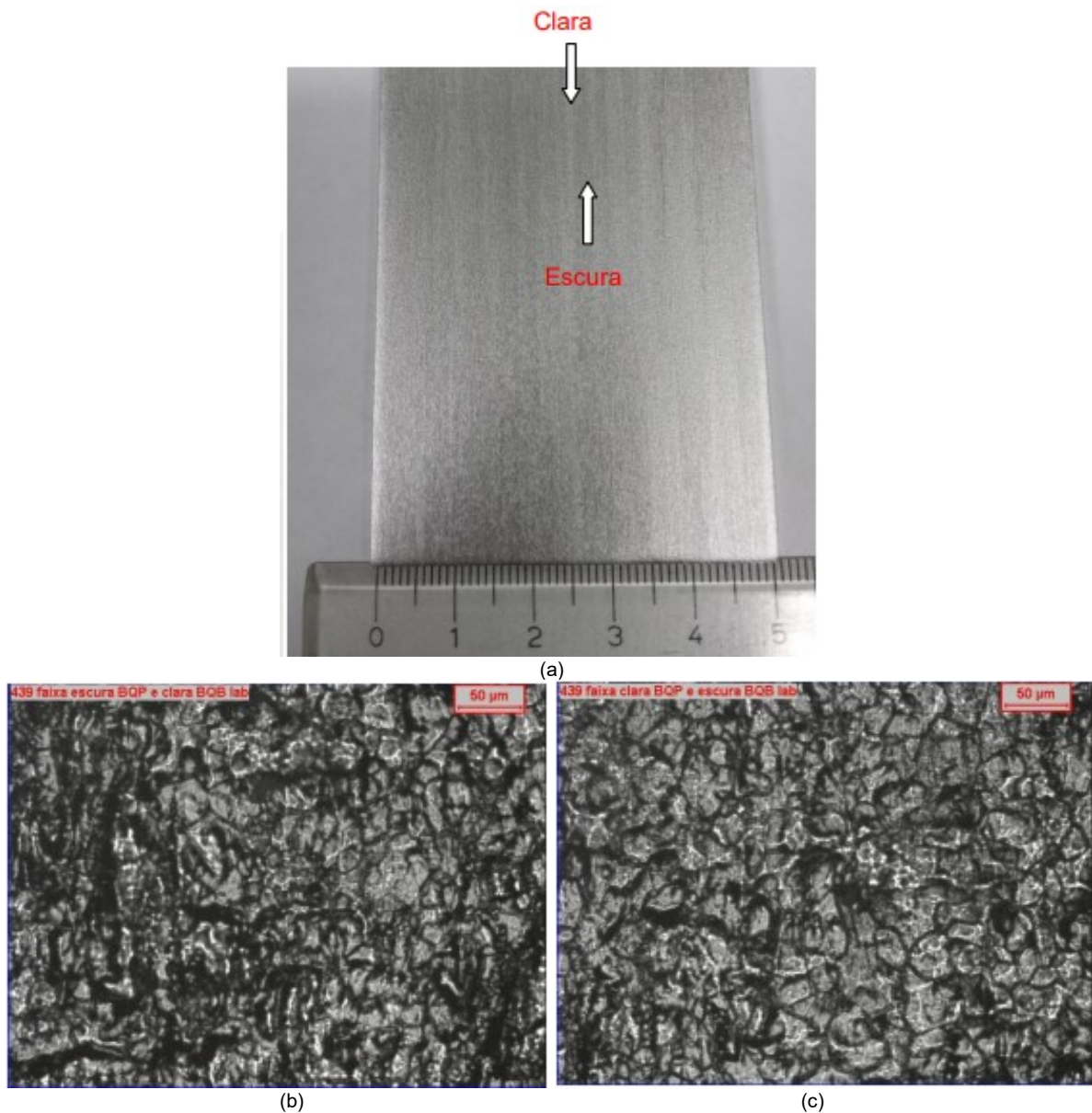
As propriedades e qualidade de um aço inoxidável são baseadas em um bom acabamento superficial: um método bastante utilizado de obtenção de uma superfície homogênea e resistente a corrosão é a decapagem (RÖGENER et al., 2012).

A decapagem é a remoção de carepas e películas de óxidos aderidas durante conformações a quente, tratamentos térmicos, soldagem e outros trabalhos de alta temperatura. A decapagem ácida é a mais utilizada por fabricantes de aços inoxidáveis por remover a contaminação metálica e a queimadura de soldagem. Dentre os demais processos de decapagem em materiais metálicos, pode-se citar: a decapagem mecânica (envolve uso de técnicas de abrasão e impacto) e a decapagem

térmica (introdução de calor com chamas abertas ou em fornos) (ASTM A380/A380M-17, 2017; GENTIL, 2011; CAREAGA, 2018).

Durante o processo de decapagem, se o ataque for mais intenso do que o recomendado, pode ocorrer o ataque nos contornos de grãos na superfície da amostra. Isso pode resultar em uma aparência mais opaca ou fosca da superfície (CASTRO, 2017). Na Figura 11 (a) a (c), observa-se a superfície de uma bobina de aço inoxidável laminada a quente e decapada em laboratório.

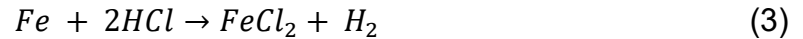
Figura 11 – Amostra de chapa após decapagem em laboratório
 (a) Foto da amostra; (b) Região com tonalidade clara e (c) Tonalidade escura



Fonte: Adaptada de Castro (2017)

4.5.1 Ácido clorídrico

Quando o material metálico é atacado pelo HCl, ocorre o fenômeno de oxirredução, desprendendo o hidrogênio, de acordo com a reação química presente na equação 3 (GENTIL, 2011).

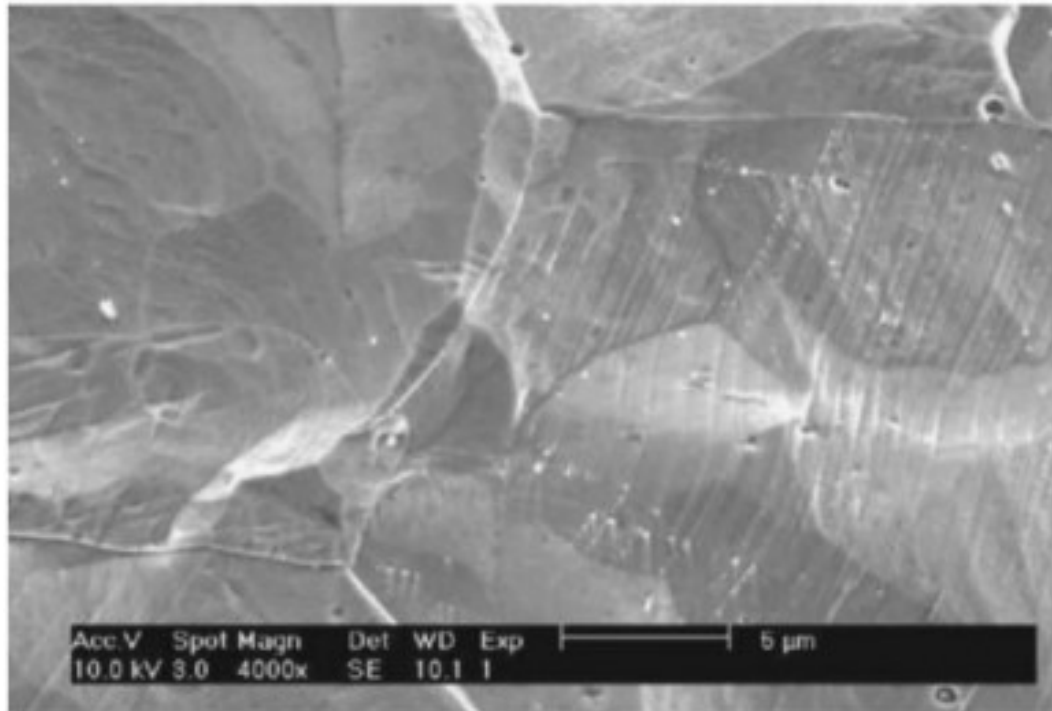


Em aços inoxidáveis, o HCl consegue penetrar na camada de passivação (Cr_2O_3) e assim reagirá com os metais, formando cloretos metálicos (SHIMID et al., 2019).

4.5.1.1 Uso do HCl como decapante

A maior eficiência e o recomendado para a decapagem química se dão pelo uso de H_2SO_4 ou uma mistura de HNO_3 com HF (ASTM A380/A380M-17, 2017). Entretanto, o uso de soluções contendo o uso de ácido mistos HF- HNO_3 é restrita devido a danos ambientais, e com isso procedimentos alternativos em ácidos oxidantes como o HCl são usados (Li, et al., 2006). Na Figura 12 observa-se a micrografia da superfície de um aço inoxidável AISI 304 após a decapagem com HCl e a remoção de óxidos.

Figura 12 – Micrografia da superfície do aço inoxidável 304, após remoção de óxidos



Fonte: Adaptada de Li, et al. (2006)

4.6 Técnica de avaliação da eficiência de inibidores de corrosão

4.6.1 Técnica gravimétrica

O ensaio gravimétrico ou perda de massa consiste na avaliação da velocidade de corrosão pela perda de massa do material quando imerso em um meio corrosivo (GENTIL, 2011).

Em casos de corrosão localizada essa técnica não pode ser empregada. Com isso, utiliza-se apenas em corrosão generalizada (VESPA, 2017).

Segundo a norma ASTM G31-21, o processo deve seguir o guia desta, pois possui como objetivo promover melhor correlação de resultados no futuro e redução de relatórios conflitantes e considerar vários fatores presentes no guia, que afetam os resultados obtidos. Também possível obter os valores de taxa de corrosão pela perda de massa conforme a equação 4.

$$T_c = \frac{K \times W}{A \times T} \quad (4)$$

Em que:

T_c =Taxa de corrosão;

K = Constante (1×10^4 g/m²h);

W = Perda de massa em gramas;

A = Área da superfície da amostra exposta em cm²;

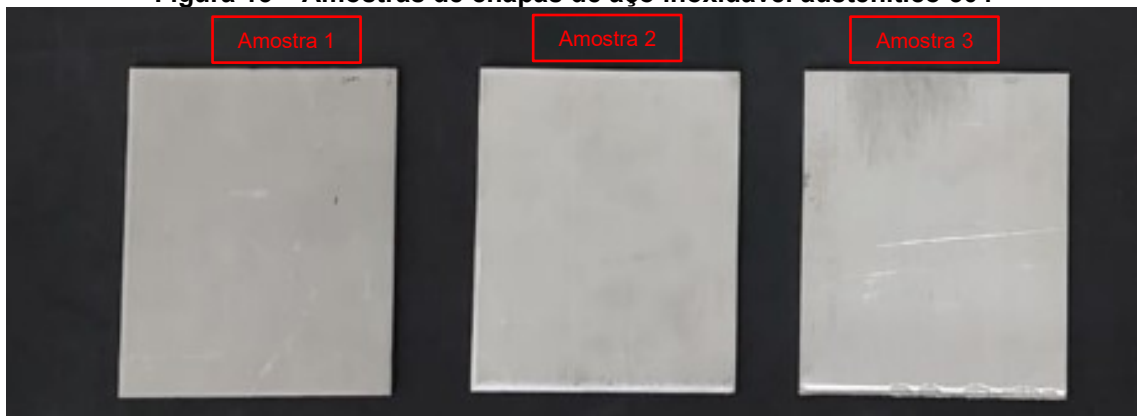
T = tempo de imersão em horas;

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

Nesse estudo foram utilizadas três amostras em chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304, com dimensões de 130mm x 100mm, demonstradas na Figura 13. As amostras foram obtidas em colaboração do Laboratório de Análise Metalúrgica da empresa Welding, Inspeções, Engenharia e Análise de Materiais, Ltda., localizada em Sertãozinho, SP.

Figura 13 – Amostras de chapas de aço inoxidável austenítico 304



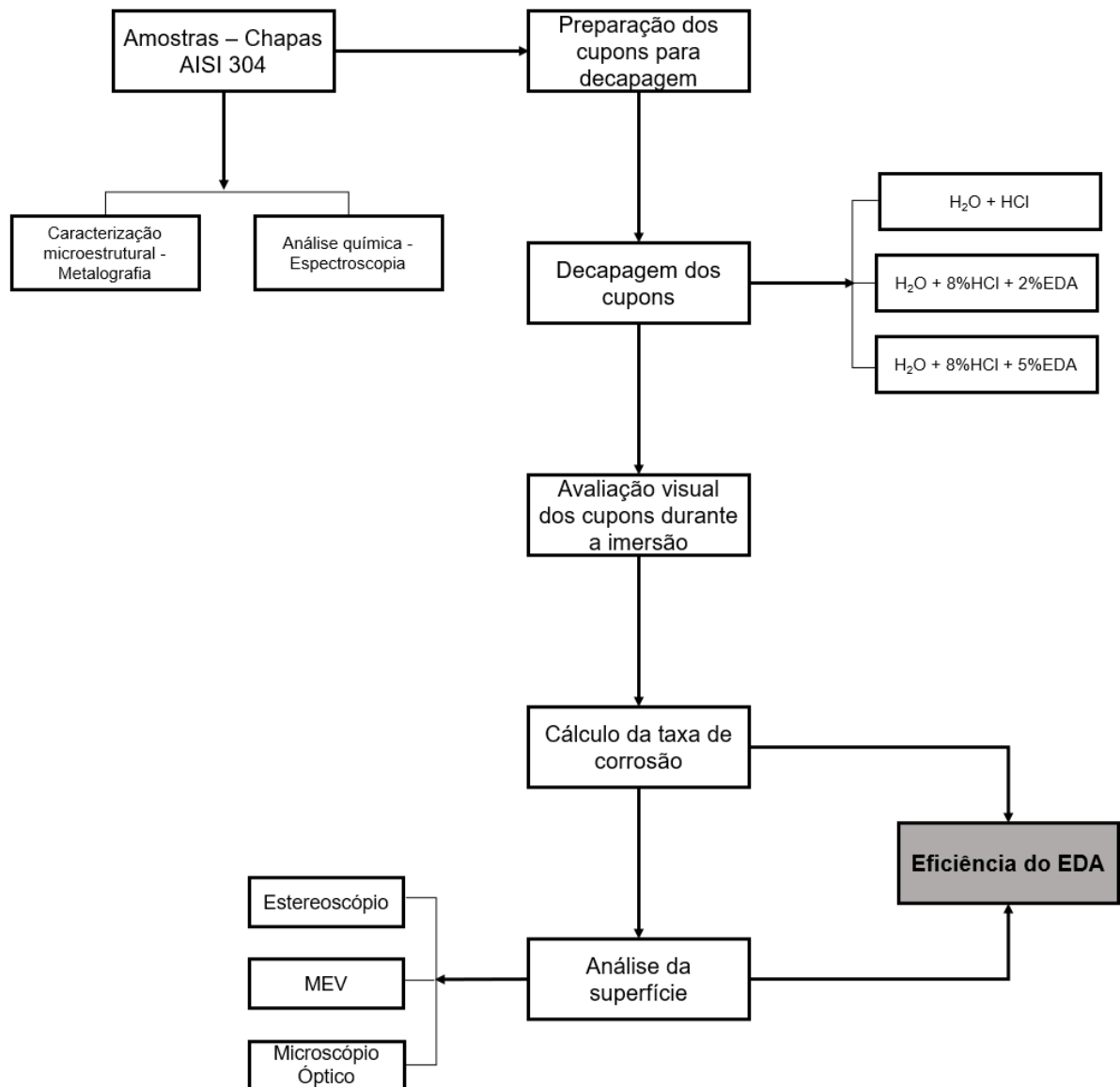
Fonte: Autoria Própria (2023)

As soluções de ácido clorídrico P.A (37%) e etilenodiamina anidra (EDA) foram adquiridas da empresa Zilquímica de Ribeirão Preto, SP.

5.2 Método

Na Figura 14 pode-se observar o fluxograma das atividades realizadas.

Figura 14 – Fluxograma das atividades realizadas



Fonte: Autoria Própria (2023)

5.2.1 Caracterização das amostras

Foram selecionadas regiões nas amostras de chapas para a realização da caracterização química e microestrutural.

5.2.1.1 Caracterização química

A caracterização química foi realizada no Espectrômetro SpectroMax da Welding, Inspeções, Engenharia e Análise de Materiais, Ltda. – Sertãozinho, SP, apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Espectrômetro SpectroMax utilizado para análise química dos cupons



Fonte: Autoria Própria (2023)

5.2.1.2 Caracterização microestrutural

O preparo metalográfico foi utilizado para caracterização das microestruturas das amostras de chapas. A partir destes, foram obtidos os cupons para realização da decapagem, os quais também foram submetidos à análise por metalografia de suas superfícies.

Nesse contexto, o procedimento de preparação envolveu o lixamento da superfície com lixas d'água de granulometria de 180 a 1200. A partir disso, realizou-se o polimento em suspensão de alumina 0,5 μ m, e em seguida, as amostras foram submetidas ao ataque eletrolítico com 10% de ácido oxálico em peso, por 15 segundos, conforme a norma ASTM E407-15. Na Figura 16 é mostrado o equipamento utilizado para o ataque da microestrutura dos materiais.

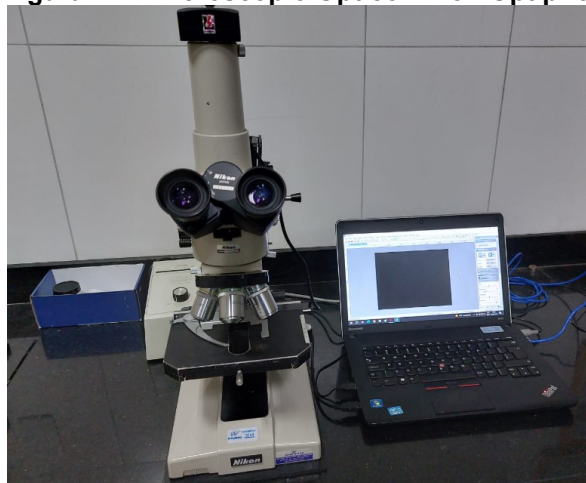
Figura 16 – Aparato e insumos utilizados no ataque eletrolítico



Fonte: Autoria Própria (2023)

Para a avaliação da microestrutura, utilizou-se a microscopia óptica (MO), com o Microscópio da Welding, Inspeções, Engenharia e Análise de Materiais Ltda, marca/modelo Nikon Optiphot, utilizando o *software* ImageView para captação das imagens como demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Microscópio Óptico Nikon Optiphot



Fonte: Autoria Própria (2023)

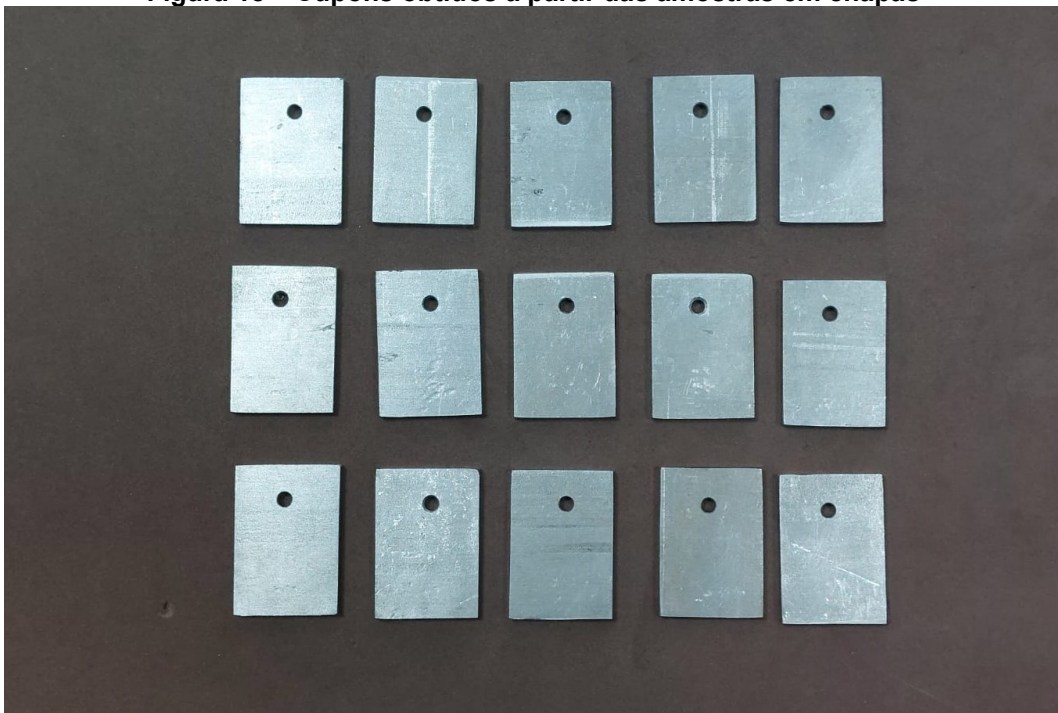
5.2.2 Preparação dos cupons para decapagem

Os cupons de corrosão foram obtidos através de corte abrasivo das amostras em chapas, obtendo um total de 15 cupons e, em seguida, foram esquadrejados para garantir dimensões uniformes e padronizadas em aproximadamente 43mm x 30mm. Além disso, foram perfurados com diâmetro de 4mm, a fim de criar local para apoiá-los durante a imersão da técnica gravimétrica.

Para evitar a ocorrência de corrosão preferencial, as superfícies onde foram realizados os cortes abrasivos, realizou-se um tratamento final, através da abrasão com lixas d'água de granulometria nº120, conforme recomendado pela norma ASTM G31-21. Os cupons são mostrados na Figura 18.

Entre os 15 cupons obtidos, 12 foram utilizados na imersão na solução de decapagem, e os outros 3 foram utilizados para análise visual e por microscopia eletrônica de varredura, a efeito de comparação antes e após a imersão.

Figura 18 – Cupons obtidos a partir das amostras em chapas



Fonte: Autoria Própria (2023)

5.2.3 Decapagem química

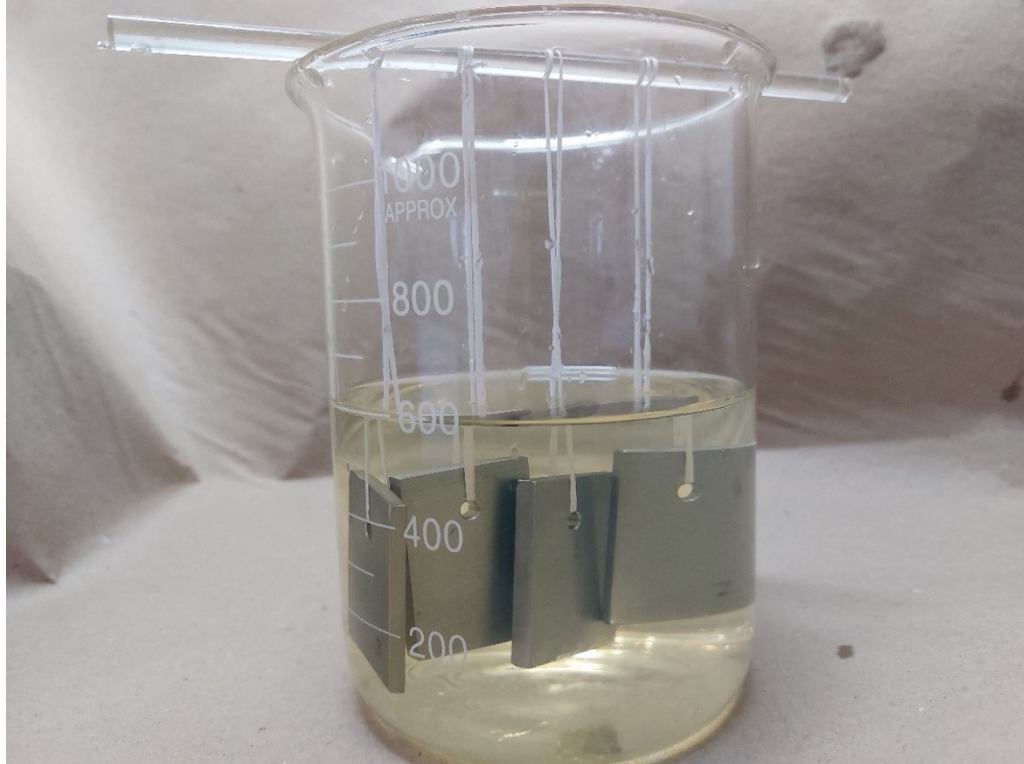
A decapagem dos cupons foi realizada através de três soluções distintas a 70°C durante 1h, sendo:

- Solução 1: H₂O destilada + 8% HCl;
- Solução 2: H₂O destilada + 8% HCl + 2% Etilenodiamina (EDA);
- Solução 3: H₂O destilada + 8% HCl + 5% Etilenodiamina (EDA).

Antes da imersão nas soluções de decapagem, foram mensurados a área e a massa de cada cupom para determinação dos parâmetros iniciais para o cálculo da taxa de corrosão (T_c) de acordo com a norma da ASTM G31-21.

Para a realização da imersão na solução de decapagem, os cupons foram suspensos através de fita teflon em um bastão de vidro, de modo que todos os cupons estivessem submersos na solução, como demonstrado na Figura 19.

Figura 19 – Procedimento para realização da imersão da solução de decapagem



Fonte: Autoria Própria (2023)

Após 1h, os cupons de corrosão foram retirados das soluções e limpos com água e acetona com o auxílio de uma escova com cerdas de nylon para a retirada dos produtos de corrosão. Em seguida foram novamente pesados, para a obtenção da massa final.

5.2.4 Análise da superfície antes e após a decapagem.

Para a análise das superfícies foram utilizados o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da USP – Campus Ribeirão Preto (FMRP-USP), do Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica (LMME), modelo JEOL JSM-6610LV, mostrado na Figura 20. Utilizou-se, também, o estereoscópio de baixo aumento Nikon Optiphot (*software* ImageView) da Welding, Inspeções, Engenharia e Análise de Materiais, Ltda apresentado na Figura 21.

Figura 20 – MEV JEOL JSM-6610LV da USP de Ribeirão Preto



Fonte: Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto - USP.

Figura 21 – Estereoscópio Nikon Optiphot



Fonte: Autoria Própria (2023)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterização química e microestrutural

Conforme os resultados apresentados na Tabela 2, pode-se constatar que as amostras de chapas utilizadas nos ensaios apresentaram composição química típica do aço inoxidável austenítico AISI 304.

Tabela 2 - Composição química da amostra utilizada para estudo

Composição Química (%)	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Amostra 1	0,079	1,12	0,405	0,024	0,010	18,28	8,28
Amostra 2	0,077	1,13	0,411	0,026	0,016	18,71	8,18
Amostra 3	0,077	1,13	0,404	0,027	0,015	18,91	8,15

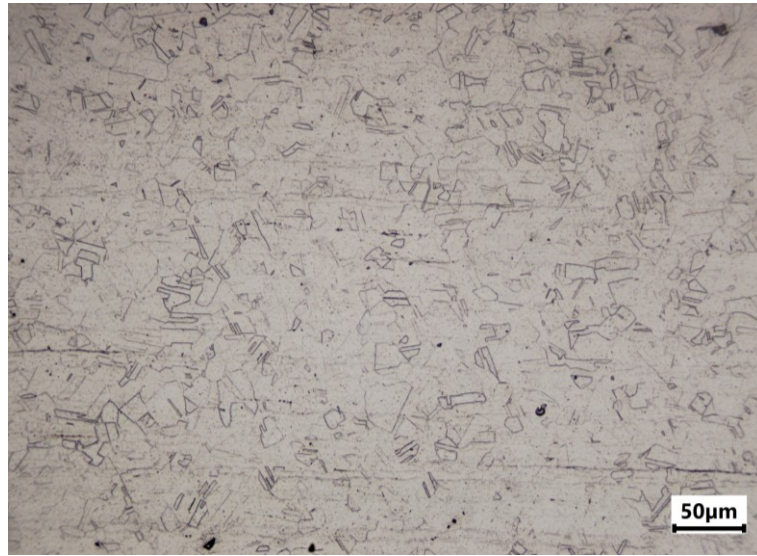
Fonte: Autoria Própria (2023)

Para a caracterização microestrutural foram obtidas imagens representantes das amostras de cada chapa recebida para a fabricação dos cupons de corrosão através de MO com aumento de 200x.

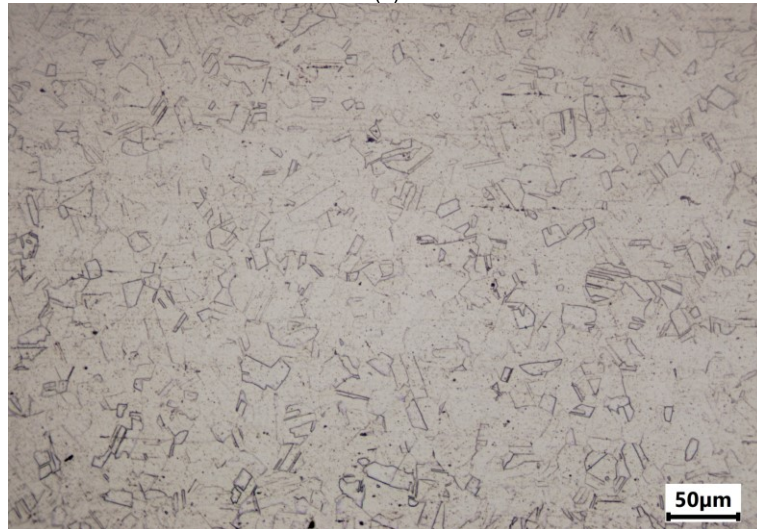
Com isso, constatou-se microestruturas de grãos austeníticos poligonais e maclados no material de fabricação das chapas, estando de acordo com as composições químicas obtidas para um aço inoxidável austenítico da série 300.

As micrografias podem ser visualizadas na Figura 22 (a) a (c).

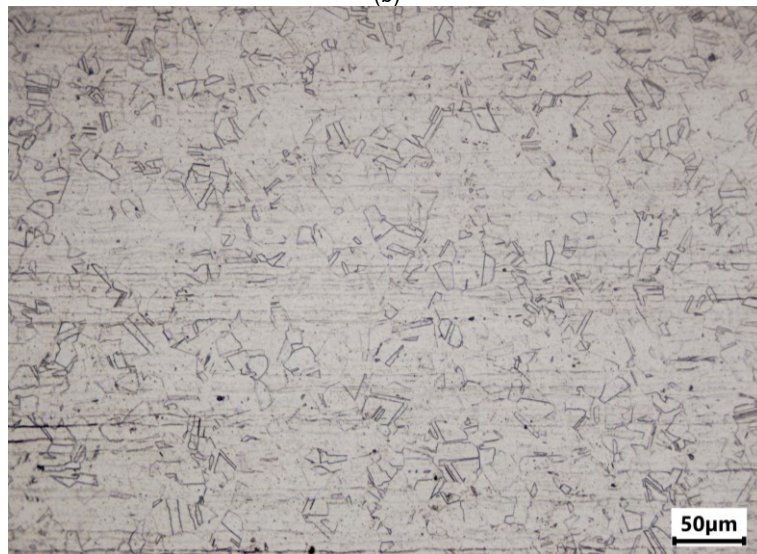
**Figura 22 – Micrografias das amostras obtidas por MO
(a) 1; (b) 2 e (c) 3.**



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria (2023)

6.2 Decapagem química

Para avaliação eficiência do inibidor de corrosão proposto, o EDA, na decapagem química, utilizou-se a técnica gravimétrica para obtenção de taxa de corrosão (T_c). Para isso os cupons foram dimensionados e os resultados são demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensões dos cupons utilizados em cada solução decapante

Solução	Cupom	Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área Exposta (cm ²)
H ₂ O + 8%HCl	1	43,20	30,03	4,46	33,04
	2	42,98	29,90	4,46	32,47
	3	42,94	30,06	4,46	32,89
	4	43,17	30,02	4,52	33,10
H ₂ O + 8%HCl + 2%EDA	5	43,11	30,03	4,47	32,99
	6	42,99	29,89	4,53	32,86
	7	43,10	30,06	4,47	33,01
	8	42,98	30,04	4,45	32,88
H ₂ O + 8%HCl + 5%EDA	9	43,01	30,00	4,46	32,88
	10	43,04	30,09	4,46	32,98
	11	42,97	30,09	4,45	32,92
	12	42,80	29,82	4,42	32,50

Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Tabela 4 observa-se resultados obtidos da massa inicial e da massa final após o ensaio da decapagem química, obtendo-se, assim, as perdas de massas, que serão utilizadas para o cálculo da taxa de corrosão (T_c) e eficiência do inibidor de corrosão.

Tabela 4 – Resultados de taxa de corrosão e eficiência do inibidor em diferentes concentrações

Solução	Cupons	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (W)
H ₂ O + 8%HCl	1	44,8750	44,7925	0,0825
	2	44,3277	44,2393	0,0884
	3	44,6063	44,5235	0,0828
	4	45,6639	45,5788	0,0851
H ₂ O + 8%HCl + 2%etilenodiamina	5	44,7962	44,7744	0,0218
	6	45,1986	45,1750	0,0236
	7	44,3462	44,8597	0,0179
	8	44,3462	44,3296	0,0166
H ₂ O + 8%HCl + 5%etilenodiamina	9	44,7017	44,7000	0,0017
	10	44,6550	44,6540	0,0010
	11	44,5535	44,5221	0,0014
	12	44,7126	44,7119	0,0007

Fonte: Autoria Própria (2023)

A partir dos resultados obtidos, com a utilização da equação 4, tem-se as respectivas taxas de corrosão (T_c), que aplicados na equação 2 obtém-se a eficiência da etilenodiamina como inibidor de corrosão na solução decapante.

Os resultados obtidos apresentaram boa reprodutibilidade e com isso, também, foi calculado a taxa de corrosão média para representação da taxa de corrosão em cada solução de decapagem, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados de taxa de corrosão e eficiência do inibidor em diferentes concentrações

Solução	Cupom	Taxa de Corrosão (g/m ² h)	Taxa de Corrosão Média (g/m ² h)	Eficiência do Inibidor (%)
H ₂ O + 8%HCl	1	24,97	25,71	-
	2	26,98		
	3	25,17		
	4	25,71		
H ₂ O + 8%HCl + 2%etilenodiamina	5	6,61	6,07	76,39%
	6	7,19		
	7	5,42		
	8	5,05		
H ₂ O + 8%HCl + 5%etilenodiamina	9	0,52	0,36	98,64%
	10	0,30		
	11	0,42		
	12	0,22		

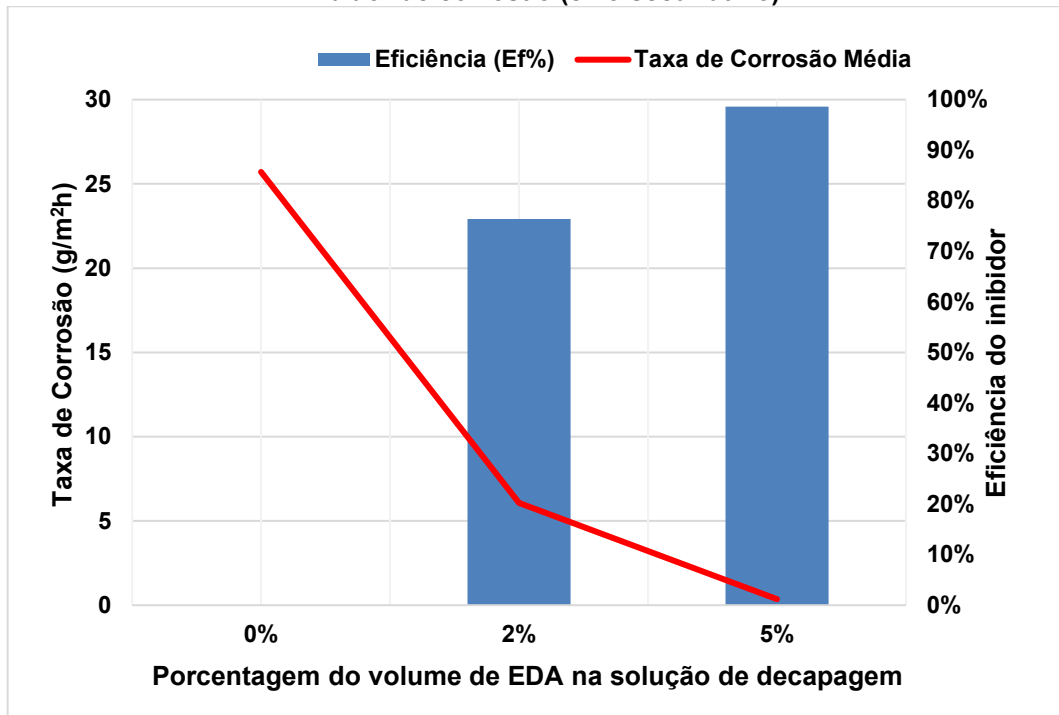
Fonte: Autoria Própria (2023)

A partir do cálculo da taxa de corrosão média e da eficiência do inibidor foi plotado um gráfico com o auxílio do MS Excel, para demonstrar a relação da porcentagem de etilenodiamina na solução decapante, com a taxa de corrosão dos cupons de aço inoxidável AISI 304 que pode ser verificado na Figura 23.

Com isso, verificou-se claramente que a presença do inibidor de corrosão provoca uma redução da taxa de corrosão do aço inoxidável AISI 304 em meio de HCl. Deste modo, nota-se que no período e temperatura de imersão estudado para realização da decapagem, a solução com 5% de etilenodiamina, apresentou melhores resultados em relação a taxa de corrosão, e conseqüentemente, menor corrosão superficial dos cupons de corrosão.

Esse comportamento corrobora com a inibição de corrosão pela formação de uma película protetora sobre a superfície do material, promovendo uma redução do processo corrosivo causado pelo HCl.

Figura 23 – Resultados da taxa de corrosão média dos cupons (eixo primário) e a eficiência do inibidor de corrosão (eixo secundário)



Fonte: Autoria Própria (2023)

6.3 Análise das superfícies antes e após o ensaio de imersão

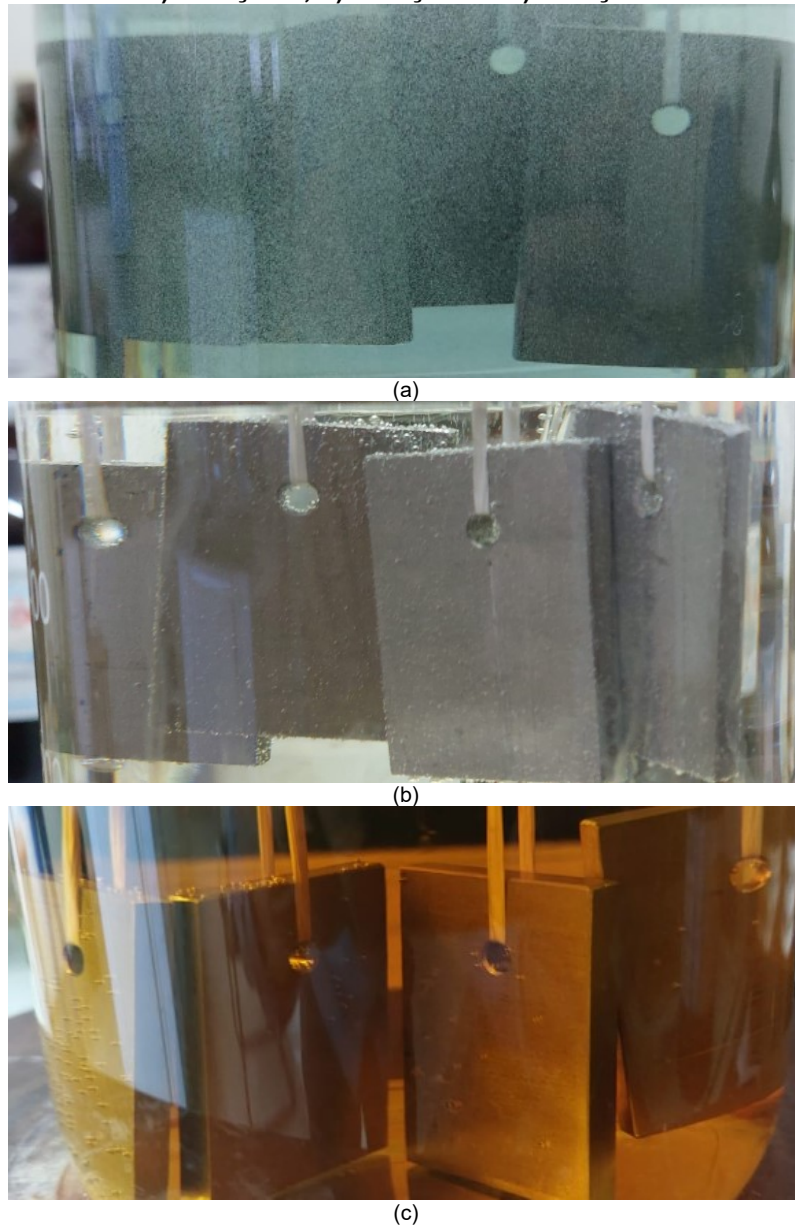
6.3.1 Análise visual

A análise visual compreendeu tanto a observação dos cupons de corrosão durante a imersão na solução de decapagem, quanto os aspectos das superfícies de exposição dos cupons na solução.

Durante o ensaio de imersão, notou-se que com a maior porcentagem de etilenodiamina na solução de decapagem, menor era a formação de bolhas de gás partindo da superfície dos cupons.

A formação das bolhas evidencia a corrosão dos cupons, que está ligada com a formação de subprodutos de corrosão, como foi visto na equação 3, o H₂ liberado na reação do HCl com a superfície metálica do aço inoxidável. Essa evidência pode ser constatada na Figura 24 (a), na qual a solução sem o inibidor de corrosão, apresenta maior formação de bolhas na superfície dos cupons, quando comparado com as soluções com o uso de inibidor Figura 24 (b) e Figura 24 (c).

**Figura 24 – Cupons imersos nas soluções de decapagem
a) Solução 1; b) Solução 2 e c) Solução 3**

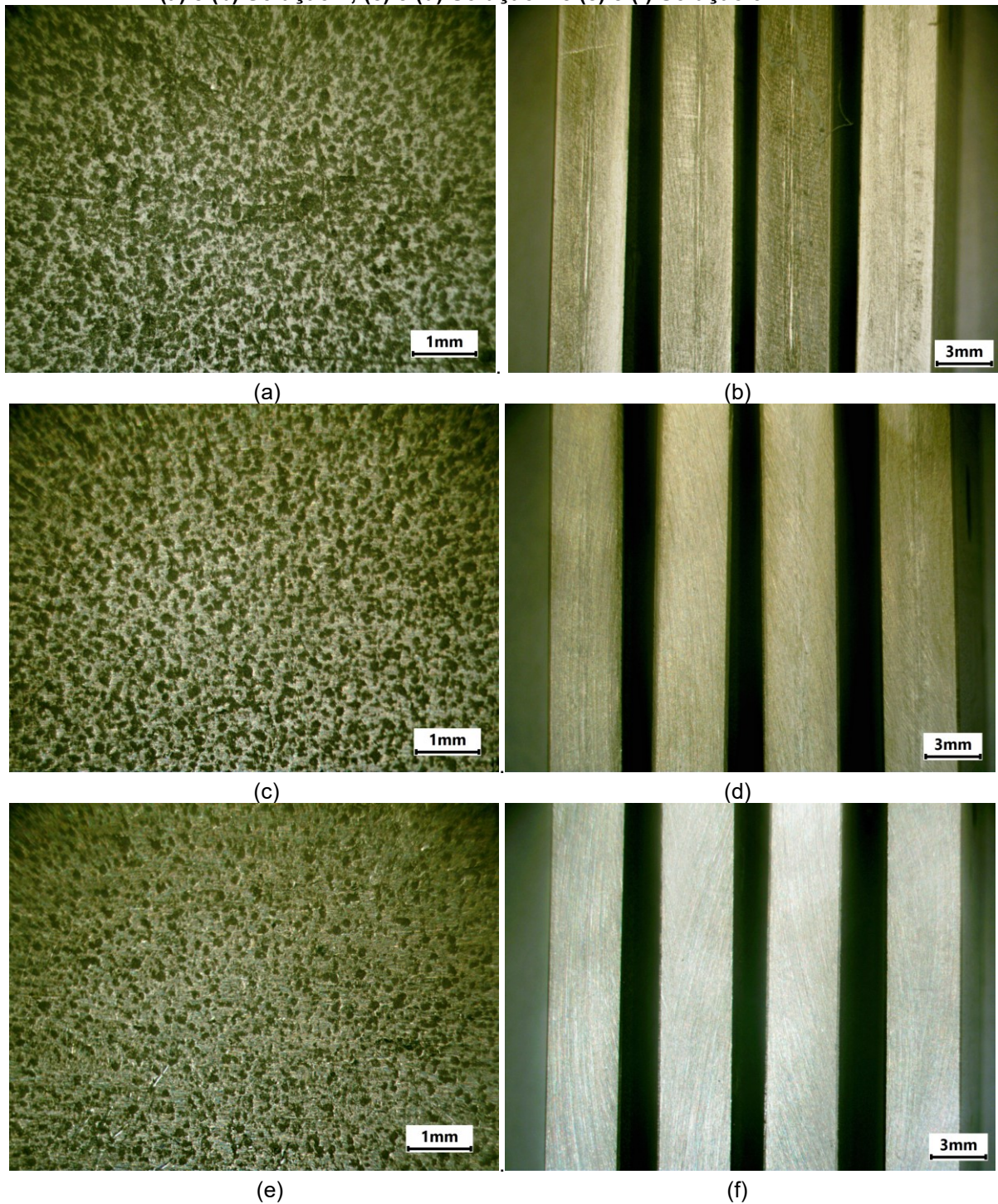


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Figura 25 (a), (c) e (e), são apresentadas as superfícies dos cupons (acabamento original das amostras em chapas) após a imersão, onde se nota que com a maior quantidade de inibidor de corrosão, menor a quantidade de manchas com o aspecto escurecido na superfície.

Já na Figura 25 (b), (d) e (f), são apresentadas as superfícies que foram lixadas antes da imersão, conforme recomendado pela norma ASTM G31-21. Nessas superfícies, notam-se um aspecto mais escuro e opaco nas superfícies sem inibidor de corrosão e um aspecto mais brilhante nas superfícies com maior quantidade de inibidor de corrosão.

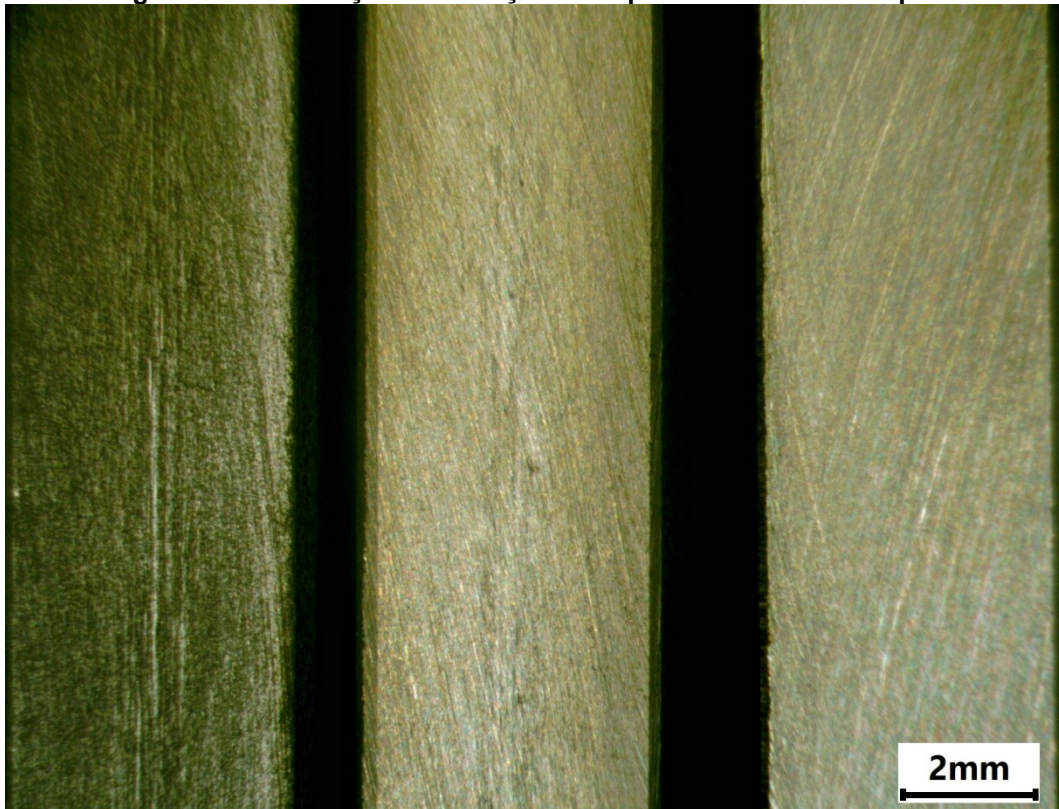
Figura 25 – Imagens obtidas pelo estereoscópio dos cupons após a decapagem (a) e (b) Solução 1; (c) e (d) Solução 2 e (e) e (f) Solução 3



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Figura 26 observam-se a superfície lixada de um cupom de cada solução de decapagem, em que se nota o aspecto diferente em cada um destes, sendo que do mais escuro para o mais brilhante se dá na ordem de soluções aplicadas: 1, 2 e 3, ou seja, a solução com maior quantidade de inibidor não obteve a superfície atacada pelo ácido clorídrico, confirmando o que foi observado durante a imersão (Figura 24).

Figura 26 – Diferença da coloração na superfície lixada dos cupons



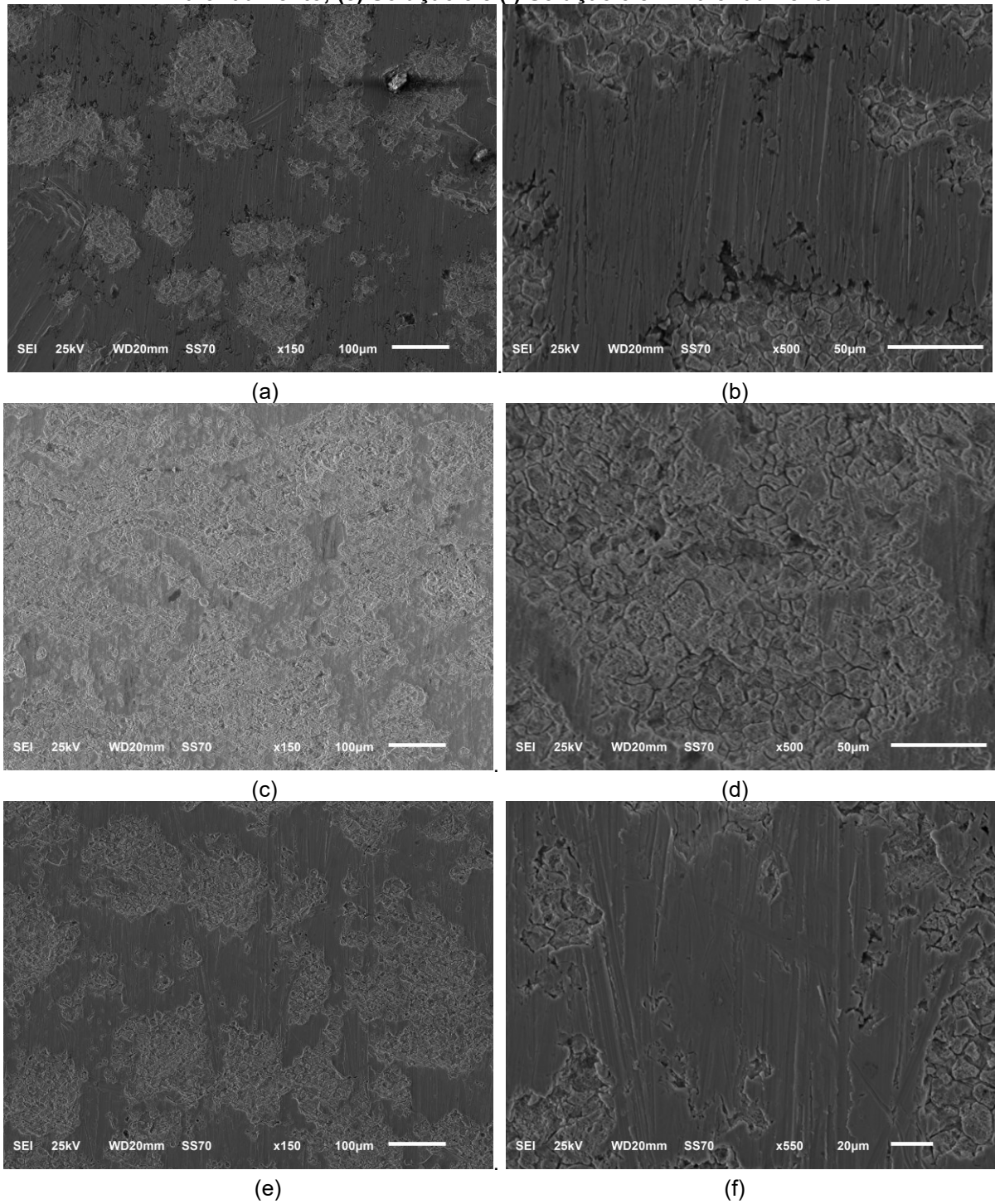
Fonte: Autoria Própria (2023)

6.3.2 Análise por microscopia eletrônica de varredura

Para a avaliação da superfície dos cupons, foram selecionados nas seguintes condições: um cupom não utilizado no ensaio de imersão a efeito de comparação; um cupom utilizado na solução 1 e um cupom utilizado na solução 3, a qual obteve menor taxa corrosão e podem ser visualizados na Figura 27(a) a (f).

O cupom sem decapagem, ou seja, como recebido para análise, apresentou uma superfície mais rugosa e a presença de óxidos. Já o cupom utilizado na solução 1, apresentou ataque nos contornos de grãos e superfície mais heterogênea, que estavam relacionados com as manchas escuras vista no subitem 6.3.1. Com isso, pôde-se observar que o cupom utilizado na solução 3, apresentou característica semelhante ao cupom sem decapagem em relação a corrosão, porém com aspecto mais liso.

Figura 27 – Micrografias da superfície dos cupons obtida no MEV
(a) Sem decapagem; (b) Sem decapagem em maior aumento; (c) Solução 1; (d) Solução 1 em maior aumento; (e) Solução 3 e (f) Solução 3 em maior aumento



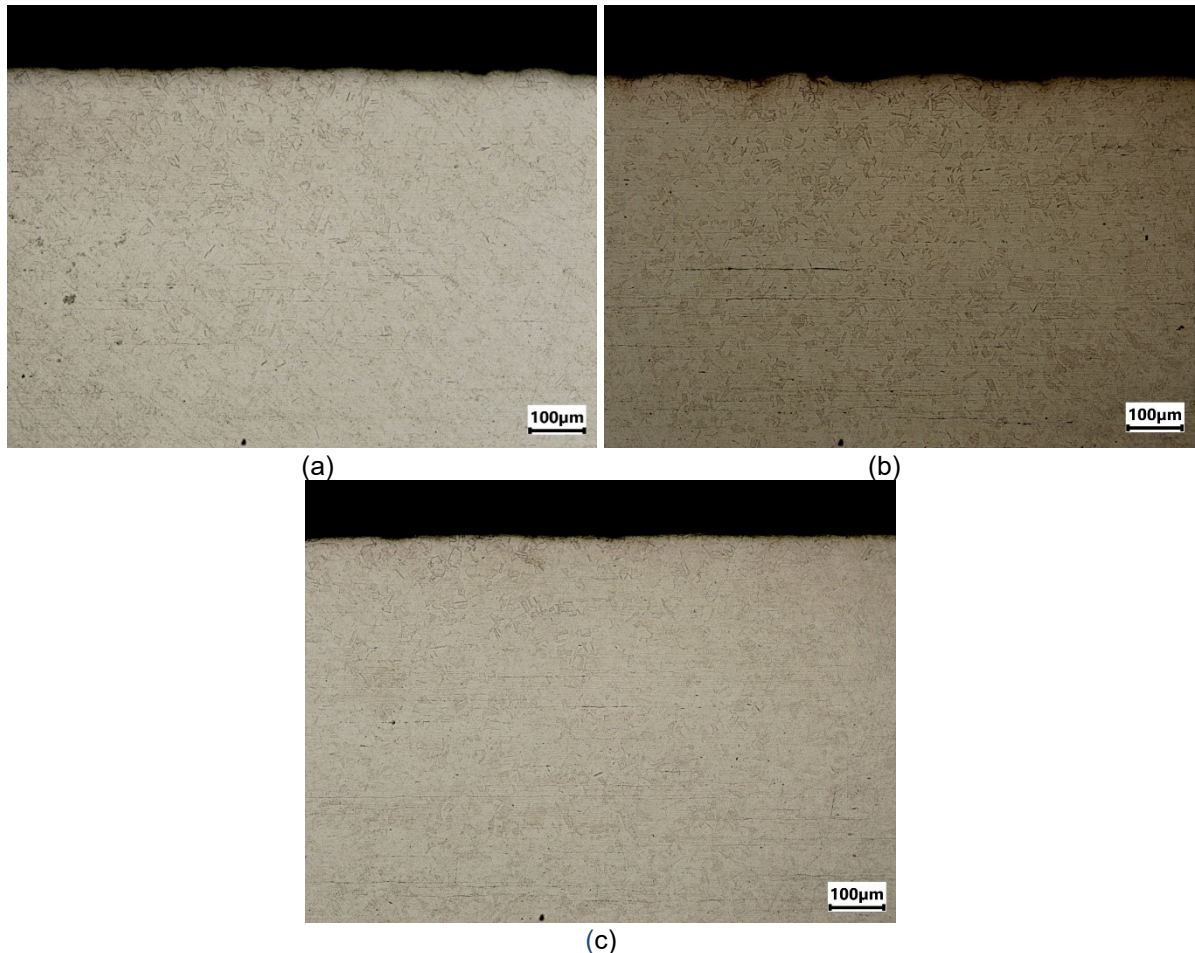
Fonte: Autoria Própria (2023)

6.3.3 Avaliação dos pites formados na superfície

A avaliação dos pites formados na superfície foi realizada a partir do corte transversal dos cupons representativos imersos em cada solução e preparados metalograficamente.

A avaliação foi realizada de acordo com a norma da ASTM G46-21, deve ser com o objetivo de avaliar a eficiência do inibidor, de acordo com a profundidade dos pites. Na Figura 28 (a) a (c), observa-se as superfícies dos cupons, originais de fabricação das chapas, imersos em cada solução. Nota-se que o cupom utilizado na solução 3, não obteve a superfície com danos significativos para análise.

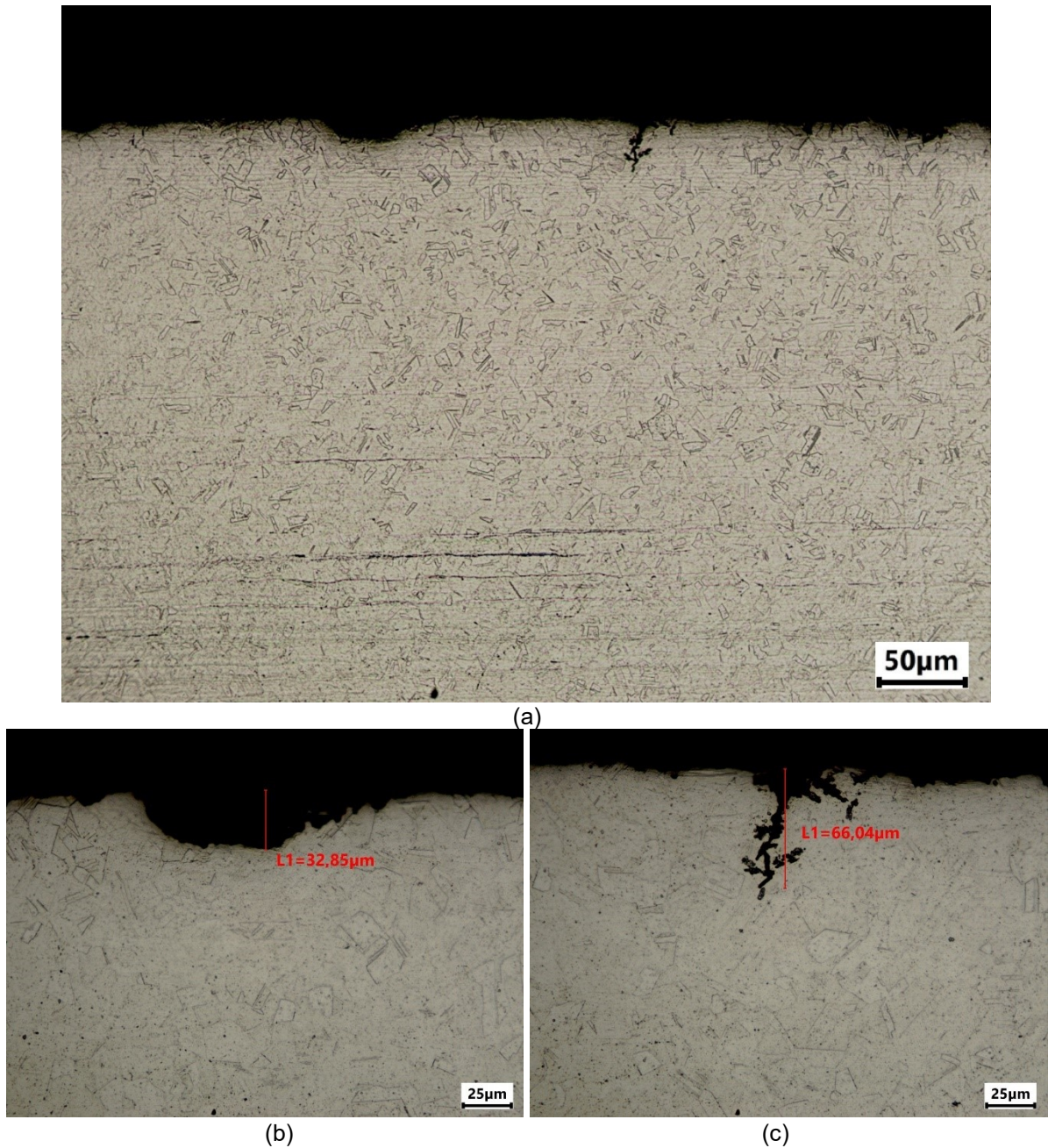
**Figura 28 – Micrografias dos cupons, obtidas por MO, na superfície de fabricação das chapas, em cada solução obtidas com aumento de 100x
(a) Solução 1; (b) Solução 2 e (c) Solução 3**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Figura 29 (a) é apresentado o cupom utilizado na solução 1, e é possível visualizar a presença de pites de corrosão causados pelo HCl. Entre esses pites, é possível observar a presença de dois tipos. Na Figura 29 (b) encontra-se o pite elíptico, já na Figura 29 (c) está presente o pite estreito e profundo.

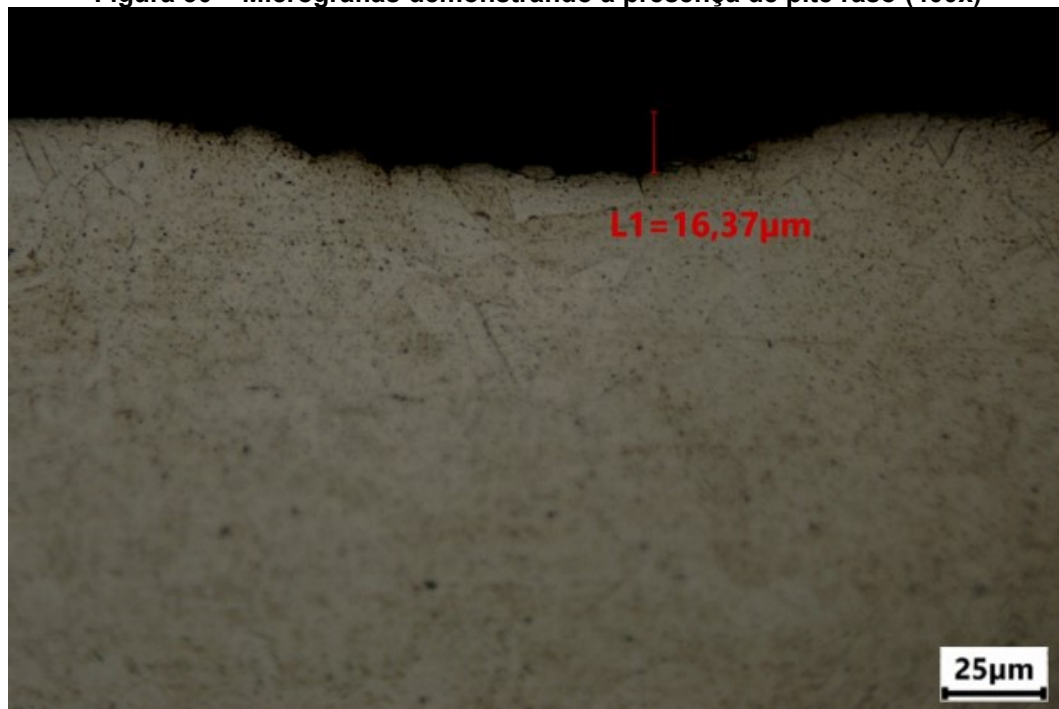
Figura 29 – Micrografias do cupom utilizado na solução 1
(a) Superfície com corrosão (200x); (b) Pite elíptico (400x) e (c) Pite estreito e profundo (400x)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Figura 30, observa-se o cupom utilizado na solução 2, onde também é possível identificar a corrosão, entretanto de forma mais branda. Com isso, é possível visualizar a presença de pite raso, dos quais estavam presentes na superfície deste cupom.

Figura 30 – Micrografias demonstrando a presença de pite raso (400x)

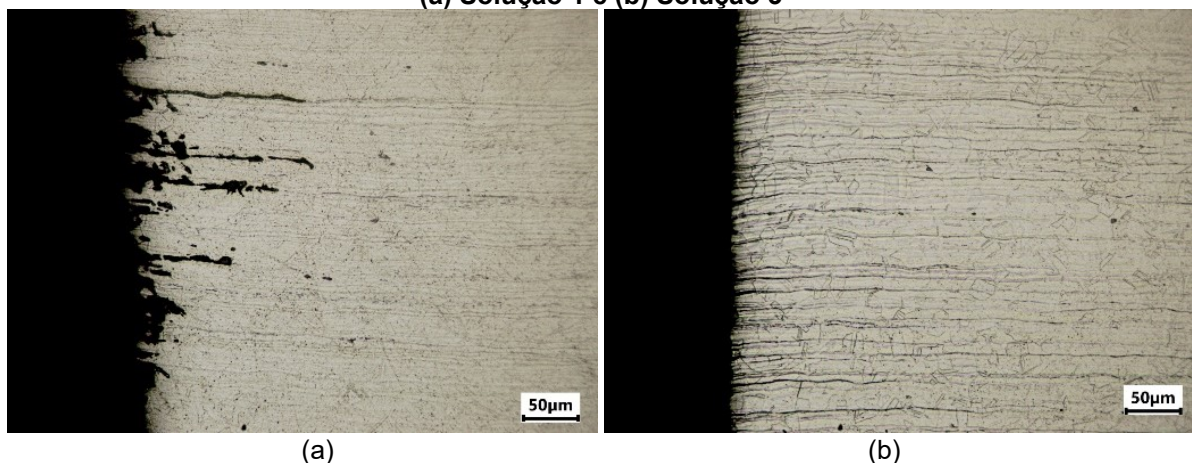


Fonte: Autorial Própria (2023)

Além disso, a efeito de comparação, investigou-se a corrosão sofrida na superfície lixada, entre os cupons com superfície mais escura e os cupons que apresentaram a superfície mais brilhante, os quais foram utilizados na solução 1 e na solução 3, respectivamente.

Na Figura 31 (a) observa-se a superfície lixada do cupom utilizado na solução 1, que comparando com o cupom utilizado na solução 3 presente na Figura 31 (b), observa-se danos bem mais severos em relação à corrosão gerada pelo HCl. Isso exemplifica as marcas para escuras observadas nos cupons utilizados na solução 1.

Figura 31 – Superfície lixada dos cupons (200x)
(a) Solução 1 e (b) Solução 3



(a)

(b)

Fonte: Autorial Própria (2023)

7 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se tem-se as seguintes conclusões:

- A material utilizado estava de acordo com o especificado para um aço inoxidável austenítico AISI 304;
- De acordo com a técnica gravimétrica conclui-se que foi eficiente com o uso de 5% de etilenodiamina na solução decapante utilizada, a qual obteve a menor taxa de corrosão;
- Na análise visual durante o ensaio, verificou-se que a solução sem inibidor resultava em mais produtos de corrosão. Além disso, foi observado um aspecto mais escurecido e opaco nos cupons de corrosão imersos nessa solução;
- Na análise das superfícies por microscopia eletrônica de varredura observou-se que a solução com 5% de etilenodiamina apresentou superfície mais lisa, já a solução sem o uso do inibidor obteve os contornos de grãos atacados;
- Na metalográfica para análise da corrosão, os cupons com menor porcentagem de inibidor e os cupons sem o inibidor, tiveram a superfície danificada pela formação de pites devido ao ataque do ácido clorídrico.

Desta forma, é possível concluir que o uso do etilenodiamina como inibidor de corrosão em 5% do volume na solução e temperatura utilizada, foi eficiente ao evitar o ataque do ácido clorídrico na superfície do aço inoxidável austenítico AISI 304.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação dentro da faixa de 2% a 5% de etilenodiamina na solução decapante para buscar a melhor eficiência em relação a quantidade e controle de corrosão;
- Variação da porcentagem de ácido clorídrico em solução;
- Análise em juntas soldadas;
- Avaliação em outras ligas de aço inoxidável da série 300;
- Avaliar da decapagem com o uso de inibidor na remoção de óxidos;
- Análise do processo corrosivo em frestas.

REFERÊNCIAS

AÇOPLANO. **Conheça a Camada Passiva do Aço Inox**. 2018. Disponível em: < <http://www.acoplano.com.br/blog/conheca-a-camada-passiva-do-aco-inox/> > Acesso em: 25 abr. 2021.

ASM INTERNATIONAL, Corrosion. **ASM Handbook**, v. 13, 1992.

ASM INTERNATIONAL, Welding Brazing and Soldering. **ASM Handbook**, v. 6, 1995.

ASTM A380/A380M-17, Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems 1. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM E407 15, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

ASTM G31-21, Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

ASTM G46-21, Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion, ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2021.

CALLISTER JR., W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2020. ISBN 9788521637288.

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

CAREAGA, A. O. **Validação de decapante alcalino para uso em equipamento de limpeza de dispositivos de pintura automotiva**. 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

CASTRO, G. M (2017). **Mecanismos da formação da superfície heterogênea no aço inoxidável ferrítico 439**. 2017. 171 f. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, ABM, 7ª edição, São Paulo, 2008.

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

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. ISBN 978-85-216-1944-4.

GERDAU. **Manual de Aços**, 2003.

GIANNETTI, B. F. et al. Avaliação da atividade dos inibidores de corrosão. Variáveis experimentais de condições de trabalho. **Eclética Química**. Araraquara, v.17, p.79-92,1992.

HOTSUMI, T. N.; KODAMA, A. L., **Investigação e caracterização de produtos naturais como inibidores de corrosão atóxicos para aço carbono em meio ácido clorídrico**. 2011, 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Universidade de São Paulo. **Laboratório Multidisciplinar de Microscopia Eletrônica**. Disponível em: <https://emu.fmrp.usp.br/laboratorios/lmme/>. Acesso em: 10 jun. 2023.

LI, L.; et al. Electrochemical Behavior of Hot-Rolled 304 Stainless Steel during Chemical Pickling in HCl-Based Electrolytes. **ECS. Journal of the Electrochemical Society**, Genk, Bélgica. p 153. Mar 2006.

LYNCH, B. **Oxide nucleation and growth mechanisms of molybdenum-containing stainless steel and the effect of pre-oxidation on passive film behavior**. 2022. 182 f. Dissertação (Doutorado em Química Analítica) - De L'Université Paris Sciences & Lettres. Paris, 2022.

OLSON, C. O. A.; LANDOLT, D. Passive films on stainless steels - chemistry, structure and growth. **Electrochimica acta**, vol. 48, n. 9. p. 1093-1104, 2003.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços inoxidáveis austeníticos. Microestrutura e Propriedades**. Hemus, 1994.

RIBEIRO, R. B.; et al. Análise morfológica da corrosão por pites em aço inoxidável austenítico AISI 310S submetido à exposição em névoa salina. **Revista Matéria**, vol. 14, n. 3, pp. 957-964, 2009.

RIVIE, R., W.; UHLIG, H., H. **Corrosion and corrosion control. An introduction to corrosion science and engineering**. 4^o Ed. Hoboken, New Jersey. Wiley-Interscience, 2008.

RÖGENER, F. et al. Metal recovery from spent stainless steel pickling solutions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 60, p. 72–77, 2012.

SANYAL, B.; **Organic Compounds as Corrosion Inhibitors in Different Environments - A Review**, Progress in Organic Coatings, v.9 n.2, pp 165 – 236, 1981.

SCHAEFFLER, A. Constitution diagram for stainless steel weld metal. **Metal Prog.**, vol. 56, n. 11. 1949. p680.

SCHMID, A. et al. Model about the course of corrosion reactions of austenitic steels in H₂S-, HCl- and CO₂- containing atmospheres at 680°C. *Oxidation of metals*. vol. 91, p 1-10, 2019.

SEDRIKS, A., J. **Corrosion of stainless steels**. Suffern. New York. Wiley Interscience, 1979.

SENATORE, Marcelo; FINZETTO, Leandro; PEREA, Eduardo. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. **Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 1, p. 175-181, Mar. 2007.

SILVA, K. et al. Etilenodiamina como inibidor de corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos 304 e 316 em meio ácido. *Revista Univap*, São José dos Campos, SP, v. 26, n. 51, p. 63-73, dezembro 2020.

VESPA, A. S. **Avaliação de inibidores de corrosão em meios agressivos que simulam os de produção de petróleo**. 2017. 158f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.