

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Matheus Raphael Diniz Junqueira

Efeitos do cloreto de amônio e do cloreto de ferro III na corrosão por pite e por frestas de aços inoxidáveis: um estudo comparativo.

Belo Horizonte – MG

2023

Matheus Raphael Diniz Junqueira

Efeitos do cloreto de amônio e do cloreto de ferro III na corrosão por pite e por frestas de aços inoxidáveis: um estudo comparativo.

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador(a): Prof.^(a) Marcello Rosa Dumont

BELO HORIZONTE - MG

2023

AGRADECIMENTOS

É com imensa satisfação que dedico este espaço aos agradecimentos, reconhecendo a importância e a contribuição de todos aqueles que, de alguma forma, tornaram possível a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Marcello Rosa Dumont, pela orientação excepcional, paciência e incentivo ao longo de todo o processo. Suas valiosas sugestões e direcionamentos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, enriquecendo não apenas o conteúdo, mas também a minha formação acadêmica.

Aos professores da banca examinadora, Aline Silva Magalhães e Elaine Carballo, agradeço pela disponibilidade em compartilhar seus conhecimentos e pela análise criteriosa, que contribuíram significativamente para a qualidade deste trabalho. Não posso deixar de expressar minha gratidão aos amigos e colegas, principalmente André, Patrick e todos os amigos que criei nessa instituição que, de maneira direta ou indireta, colaboraram para a realização deste estudo. Suas discussões, histórias e apoio moral foram elementos-chave para superar desafios e manter o foco ao longo dessa jornada acadêmica, além dos nossos momentos de descanso.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, proporcionando apoio emocional e compreensão durante as horas dedicadas à pesquisa e redação deste trabalho, meu mais profundo agradecimento. Que mesmo com a ansiedade a mil, me apoiou e confiou que faria o possível para conseguir minhas metas.

Por fim, agradeço a todas as instituições e pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste TCC. Ao Jancler pelas amostras e estudos comparativos, à Thais Mendonça pelo apoio e dicas de como realizar o trabalho. Este trabalho não seria possível sem a generosidade e colaboração de cada um de vocês. Que este seja apenas o início de uma jornada acadêmica repleta de aprendizado contínuo e descobertas. Obrigado a todos que fizeram parte desta trajetória.

RESUMO

O estudo investiga o comportamento da corrosão por pite no aço AISI 316L em ambientes de imersão contendo cloreto férrico III e cloreto de amônio. A pesquisa tem como objetivo comparar a resistência à corrosão por pite e fresta do aço inoxidável AISI 316L nesses ambientes corrosivos. A preparação das amostras, exame de corrosão e testes de pite foram conduzidos de acordo com as normas ASTM G1-03, G46-21 e G48-11. A pesquisa experimental envolveu testes de imersão e análise microscópica utilizando Microscopia Óptica (MO).

Os resultados do estudo revelaram que as amostras de aço apresentaram maior resistência à corrosão na solução de cloreto de amônio. Essa descoberta tem implicações significativas para compreender o comportamento do aço AISI 316L em diferentes ambientes de imersão e fornece detalhes valiosos para aplicações em ambientes industriais relevantes.

As descobertas do estudo contribuem para o corpo de conhecimento sobre o comportamento de corrosão do aço AISI 316L, especialmente na presença de cloreto férrico III e cloreto de amônio. A metodologia de pesquisa, incluindo o uso de normas ASTM e análise microscópica, garante a confiabilidade e precisão dos resultados. A investigação lança luz sobre o desempenho do aço AISI 316L em ambientes corrosivos específicos, oferecendo implicações práticas para indústrias onde esse tipo de aço é utilizado.

A natureza abrangente do estudo, abrangendo a preparação das amostras, exame de corrosão e testes de pite, destaca sua importância no avanço da compreensão do comportamento da corrosão por pite no aço AISI 316L. As implicações do estudo se estendem a indústrias e aplicações onde a resistência do aço AISI 316L à corrosão por pite e fresta é de suma importância.

Em conclusão, a pesquisa fornece informações valiosas sobre o comportamento do aço AISI 316L em ambientes de imersão contendo cloreto férrico III e cloreto de amônio. Os resultados contribuem para a compreensão do comportamento da corrosão por pite e têm implicações práticas para indústrias que utilizam o aço AISI 316L. A metodologia rigorosa e a análise abrangente do estudo garantem a confiabilidade e importância de suas descobertas.

Palavras-chave: Aço inoxidável 316L, corrosão por pite, corrosão por frestas, cloreto de amônio, cloreto férrico III.

ABSTRACT

The study investigates the behavior of pitting corrosion in AISI 316L steel in immersion environments containing ferric chloride III and ammonium chloride. The research aims to compare the resistance to pitting and crevice corrosion of AISI 316L stainless steel in these corrosive environments. Sample preparation, corrosion examination, and pitting tests were conducted in accordance with ASTM standards G1-03, G46-21, and G48-11. The experimental research involved immersion tests and microscopic analysis using Optical Microscopy (MO).

The results of the study revealed that the steel samples exhibited greater resistance to corrosion in the solution of ammonium chloride. This finding has significant implications for understanding the behavior of AISI 316L steel in different immersion environments and provides valuable insights for applications in relevant industrial settings.

The study's findings contribute to the body of knowledge on the corrosion behavior of AISI 316L steel, particularly in the presence of ferric chloride III and ammonium chloride. The research methodology, including the use of ASTM standards and microscopic analysis, ensures the reliability and accuracy of the results. The investigation sheds light on the performance of AISI 316L steel in specific corrosive environments, offering practical implications for industries where this type of steel is utilized.

The comprehensive nature of the study, encompassing sample preparation, corrosion examination, and pitting tests, underscores its significance in advancing the understanding of pitting corrosion behavior in AISI 316L steel. The study's implications extend to industries and applications where the resistance of AISI 316L steel to pitting and crevice corrosion is of paramount importance.

In conclusion, the research provides valuable insights into the behavior of AISI 316L steel in immersion environments containing ferric chloride III and ammonium chloride. The results contribute to the understanding of pitting corrosion behavior and have practical implications for industries utilizing AISI 316L steel. The study's rigorous methodology and comprehensive analysis ensure the reliability and significance of its findings.

Keywords: 316L stainless steel, pitting, crevice corrosion, ammonium chloride, ferric chloride III.

LISTA DE SIGLAS

AISI – American Iron and Steel Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

MO – Microscópio Óptico

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

EDS – Espectroscopia por dispersão de elétrons

TIG – Tungsten Inert Gas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corrosão de metal após 24 horas em 5% NaCl e 500-lb/in. pressão de oxigênio	15
Figura 2 - Tipos de corrosão por pite	17
Figura 3 - Microestrutura de aço UNS S43000 após tratamento em solução em 1160 °C por 20 min. A precipitação intergranular de carbonetos de cromo podem ser notadas. Ácido utilizado: 0,5 M H ₂ SO ₄	18
Figura 4 - Fluxograma do processo experimental	22
Figura 5 - Amostras 1 a 5 em imersão na solução de cloreto de amônio	24
Figura 6 - Disposição das amostras 13 e 14 no ensaio de corrosão por frestas	25
Figura 7 - Amostras 6 a 10 em imersão na solução de cloreto férrico III	26
Figura 8 - Resultados das amostras imersas em cloreto de amônio após 72 horas	27
Figura 9 - Resultado das amostras imersas em cloreto de ferro III após 72 horas	27
Figura 10 - Amostras 1 a 5, frente e verso, após imersão de 380 horas em cloreto de amônio	28
Figura 11 - Amostras 6 a 10, frente e verso, após imersão de 380 horas em cloreto de ferro III	29
Figura 12 - Microscopias da amostra de controle na face laminada e cortada	30
Figura 13 - Microscopia das amostras 1 a 5 após 380 horas de imersão em cloreto de amônio	31
Figura 14 - Microscopia da mancha das amostras 4 e 5 após 380 horas de imersão em cloreto de amônio	32
Figura 15 - Pite apresentado na lateral superior de uma amostra em cloreto de ferro III após 72 horas	33
Figura 16 - Pites apresentados na lateral superior das amostras 6 a 10 imersas em cloreto de ferro III após 380 horas	33
Figura 17 - Microscopia da área laminada das amostras 6 a 10 após 380 horas de imersão em cloreto de ferro III	34
Figura 18 - Microscopia da área cortada das amostras 6 a 10 após 380 horas de imersão em cloreto de ferro III	35
Figura 19 - Microscopia do interior do pite da amostra 7 após 380 horas de imersão em cloreto de ferro III	37
Figura 20 - Amostras 11 e 12 após imersão de 24 horas em cloreto de ferro III e ácido clorídrico para ensaio de corrosão por frestas	37

Figura 21 - Amostras 13 e 14 após imersão de 24 horas em cloreto de amônio e ácido clorídrico para ensaio de corrosão por frestas	38
Figura 22 - Amostras 13 e 14 após imersão de 120 horas em cloreto de amônio e ácido clorídrico para ensaio de corrosão por frestas	39
Figura 23 - Micrografias das amostras 11 e 12 após 24 horas e amostras 13 e 14 após 120 horas na área de contato com o dispositivo polimérico	39
Figura 24 - Micrografias das amostras 11 e 12 após 24 horas e amostras 13 e 14 após 120 horas fora da área de contato com o dispositivo polimérico	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química típica dos aços utilizados (% em massa)

23

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivos específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Aço inoxidável	13
3.2	Corrosão em aço inoxidável	13
3.3	Corrosão por pite	14
3.4	Corrosão por frestas	17
3.5	Métodos para prevenção de corrosão	19
3.6	Normas dos testes de corrosão	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	Materiais	22
4.2	Métodos	23
4.2.1	Caracterização microestrutural	23
4.2.2	Testes de corrosão	23
4.2.2.1	Cloreto de amônio para ensaio de pite	24
4.2.2.1.1	Adição de ácido clorídrico para ensaio de frestas	25
4.2.2.2	Cloreto de ferro III para ensaio de pite	25
4.2.2.2.1	Adição de ácido clorídrico para ensaio de frestas	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6	CONCLUSÕES	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Na indústria petroquímica e química, é imprescindível que o planejamento das tubulações seja de qualidade, pois há muitos fatores que podem prejudicar a linha de produção e a composição dos produtos, como a qualidade da solda, o levantamento de químicos corrosivos no fluido, a pressão da tubulação. Os aços mais utilizados para essas tubulações são os aços inoxidáveis American Iron and Steel Institute (AISI) 304 e 316L e Duplex, que apresentam uma alta resistência à corrosão.

Uma característica dos metais, cuja resistência à corrosão depende da formação de camada passiva, é a possível apresentação de um potencial de pite. Os métodos eletroquímicos permitem determinar este parâmetro, que caracteriza a susceptibilidade de um metal à corrosão por pite em uma dada solução. É definido como o potencial menos positivo para a nucleação e propagação do pite. Varia, principalmente, com a temperatura e concentração de íons cloreto e com a composição da liga. Os principais elementos de liga responsáveis pelo aumento da resistência à corrosão por pite dos aços austeníticos são o Cr, Ni, Mo e N (SEDRIS, 1996). De acordo com BOND e LIZLOVS (1968), na presença de Mo, o potencial de passivação dos aços inoxidáveis austeníticos também se reduz, facilitando o estado de passivação. O domínio de passivação é, contudo, reduzido pelo aumento da temperatura e pela concentração de íons cloreto (SHREIR et al, 1994).

Do ponto de vista de projeto, as estruturas industriais precisam ser restauradas devido aos desgastes e/ou falhas que ocorrem. A manutenção mais usual, devida a sua alta versatilidade e custo baixo, é a soldagem através do processo de soldagem Tungsten Inert Gas (TIG) (GTAW), com diversas implicações técnicas (utilização de gases, parada de produção, entre outros) e metalúrgicas (fases resultantes frágeis, intermetálicas e/ou carbonetos complexos), que demandam custo e geram riscos à integridade mecânica do material, pois traz efeitos que alteram sua microestrutura e afetam suas propriedades anticorrosivas (LESSA, 2016).

Neste trabalho foi investigada a resistência à corrosão por pite e intersticial do aço AISI 316L, material muito empregado em tubulações industriais de alta resistência à corrosão. Foi utilizado meio contendo cloreto de ferro, conforme norma ASTM G48 e comparativamente meio contendo cloreto de amônio, contaminante presente em processos petroquímicos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é investigar o comportamento da corrosão por pites e intersticial no aço AISI 316L em ambientes de imersão contendo cloreto férrico III e cloreto de amônio, visando compreender os fatores que influenciam a formação e propagação de pites.

2.1 Objetivos específicos

- Investigar o efeito do cloreto de amônio e cloreto de ferro na formação de pites conforme norma American Society for Testing and Materials (ASTM) G48.
- Investigar o efeito do cloreto de amônio e cloreto de ferro na corrosão intersticial conforme norma ASTM G48
- Avaliar a morfologia e a profundidade dos pites formados nas amostras de aço.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço inoxidável

O aço inoxidável, ou simplesmente aço inox, é uma liga metálica composta de ferro e carbono à qual se adiciona pelo menos 10,5 % de cromo, o que lhe confere a capacidade de resistir à corrosão. Outros elementos de liga como níquel, molibdênio, titânio, nióbio, entre outros, podem estar presentes, conferindo características específicas (ISSF, 2019).

Aumentar o teor de cromo além do mínimo de 10,5% confere ainda maior resistência à corrosão. A resistência à corrosão pode ser melhorada e uma ampla gama de propriedades proporcionadas, pela adição de 8% ou mais de níquel. A adição de molibdênio aumenta ainda mais a resistência à corrosão (em particular, resistência à corrosão por pite), enquanto o nitrogênio aumenta a resistência mecânica e aumenta a resistência ao pite (ISSF, 2019).

Os aços inoxidáveis do grupo austenítico contém mais classes, que são usados em maiores quantidades, do que qualquer outra categoria de aço inoxidável. Aços inoxidáveis austeníticos exibem resistência à corrosão superior aos ferríticos e aços inoxidáveis martensíticos. O desempenho de corrosão pode ser variado para atender a uma ampla gama de ambientes de serviço por ajuste cuidadoso da liga, por exemplo, variando o carbono ou conteúdo de molibdênio. Estes materiais não podem ser endurecidos por tratamento térmico e reforçados pelo endurecimento do trabalho (ISSF, 2019).

Tanto os aços-carbono como os aços inoxidáveis sofrem uma diminuição nos valores de suas propriedades mecânicas quando trabalham em altas temperaturas. Nos aços comuns, a perda nas propriedades mecânicas é mais significativa que nos aços inoxidáveis austeníticos, o que explica a preferência na escolha destes materiais para aplicações em altas temperaturas (CORBÓ, 2008).

3.2 Corrosão em aço inoxidável

Os elementos metálicos que constituem os aços inoxidáveis reagem com bastante facilidade. Um deles, em particular o Cr, possibilita a formação de filmes que protegem essas ligas de ataques subsequentes.

À medida que aços com mais altos teores de Cr são expostos à ambientes com a presença de oxigênio, uma camada passiva é criada por esse contato, que protege o aço contra a corrosão atmosférica. O filme passivo criado é rico nos

elementos mais oxidáveis (cromo) sendo utilizado como um metal de sacrifício (ISSF, 2019).

Em geral, os aços inoxidáveis apresentam uma boa resistência à corrosão em meios oxidantes (que facilitam a formação e a conservação dos filmes passivos). A resistência destes materiais à corrosão é fraca em meios redutores (que não possibilitam a formação destes filmes ou os destroem) (CORBÓ, 2008).

Os aços inoxidáveis austeníticos, dentre os quais o AISI 304 (18%Cr-8%Ni) é o mais popular, têm excelente resistência à corrosão, excelente ductilidade (existe aqui uma grande mudança nas propriedades mecânicas se comparados com os ferríticos) e excelente soldabilidade. A adição de molibdênio (cerca de 2%) transforma o 304 no aço inoxidável AISI 316, um material muito mais resistente à corrosão por pites e por frestas (CORBÓ, 2008).

3.3 Corrosão por pite

A corrosão por pite afeta metais e ligas como aço, ferro, alumínio e outros. Ela geralmente se restringe a áreas específicas do material, penetra e ataca rapidamente sendo difícil de detectar e ela ocorre mais comumente onde a camada de revestimento passivo é fisicamente danificada ou quimicamente atacada, o que cria um ponto fraco onde a água ou soluções corrosivas atacam o substrato. Materiais adjacentes frequentemente parecem não ser afetados. Caso não seja controlada, a corrosão por pite pode ser devastadora para sistemas de cobertura ou qualquer estrutura metálica. Ela ocorre rapidamente e pode facilmente ser ignorada, porque muitos a consideram a forma mais perigosa de corrosão (D&D COATINGS, 2019).

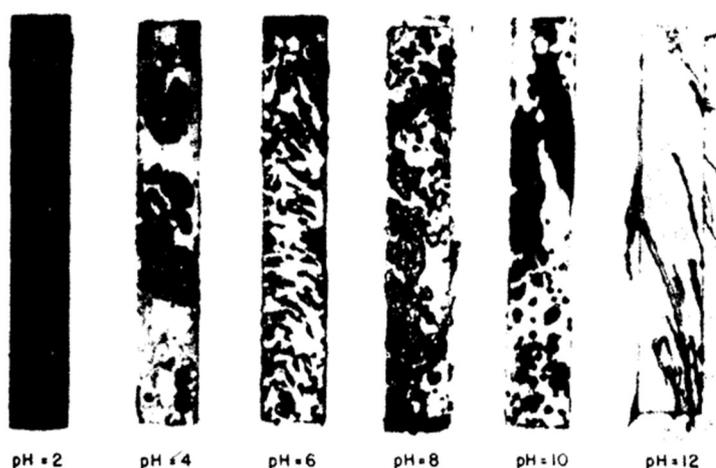
A corrosão por pite é uma forma de ataque extremamente localizado que resulta em furos no metal. Esses orifícios podem ser pequenos ou grandes em diâmetro, mas na maioria dos casos são relativamente pequenos. Às vezes, os pites são isolados ou tão próximos uns dos outros que parecem uma superfície áspera. Geralmente um pite pode ser descrito como uma cavidade ou furo com o diâmetro da superfície aproximadamente igual ou menor que a profundidade. A corrosão por pites é uma das formas mais destrutivas e insidiosas de corrosão, o que faz com que o equipamento falhe devido à perfuração com apenas uma pequena perda percentual de peso de toda a estrutura. Muitas vezes é difícil detectar pites devido ao seu pequeno tamanho e porque os pites são frequentemente cobertos com produtos de corrosão. Além disso, é difícil medir quantitativamente e comparar a extensão dos pites por causa da variação de profundidades e número de pites que podem ocorrer

em condições idênticas. Corrosão por pite também é difícil de prever por testes em laboratório. Às vezes, os pites exigem muito tempo, vários meses ou um ano, para aparecer em serviço real. A corrosão por pite é particularmente catastrófica por ser uma forma localizada e intensa de corrosão, e as falhas geralmente ocorrem com extrema rapidez (FONTANA & GREENE, 1986).

Além disso, os pites tendem a minar ou rebaixar a superfície à medida que crescem. Os danos na subsuperfície são geralmente muito mais graves do que o indicado pela aparência da superfície. O pite pode ser considerado como o estágio intermediário entre a corrosão geral e a resistência completa à corrosão. O cloreto férrico muito diluído, frio, não produz nenhum ataque (em pouco tempo) em aços, mas o cloreto férrico concentrado e aquecido ataca o aço inoxidável (FONTANA & GREENE, 1986).

Riggs, Sudbury e Hutchinson observaram um exemplo notável disso durante um estudo dos efeitos de alta pressão de oxigênio e pH na corrosão do aço por uma salmoura de 5% NaCl. Na Figura 1 é apresentado que à medida que o pH aumenta, a corrosão progride de corrosão geral para pite altamente localizado. A partir de pH 4, os pites são cobertos por uma capa de produtos de corrosão. Em pH 12, os produtos de corrosão assumem uma forma tubular incomum e as taxas de corrosão são de 17.000 mpy (mils per year) no fundo dos tubos (FONTANA & GREENE, 1986).

Figura 1 - Corrosão de metal após 24 horas em 5% NaCl e 500-lb/in. pressão de oxigênio



Fonte: Fontana & Greene, 1986.

Do ponto de vista prático, a maioria das falhas por pite são causadas por cloreto e íons contendo cloro. Os cloretos estão presentes em concentrações variadas na maioria das águas e soluções feitas com água. Muitos equipamentos operam em água do mar e águas salobras. Os hipocloritos (branqueadores) são difíceis de trabalhar devido à sua forte tendência à corrosão. Talvez a melhor explicação seja a tendência de formação de ácido dos sais de cloreto e a alta resistência de seu ácido livre (HCl). A maioria dos pites está associada a íons haletos, sendo os cloretos, brometos e hipocloritos os mais prevalentes. Fluoretos e iodetos têm tendências comparativamente pequenas (FONTANA & GREENE, 1986).

Íons metálicos oxidantes com cloretos são agentes agressivos de pite. Cúprico, férrico, e haletos de mercúrio são extremamente agressivos. Mesmo as ligas mais resistentes à corrosão podem ser perfuradas por CuCl_2 e FeCl_3 . Os haletos dos íons metálicos não oxidantes (por exemplo, NaCl , CaCl_2) causam corrosão por pite, mas em um grau muito menor de agressividade. Cloretos cúpricos e férricos não requerem a presença de oxigênio para promover o ataque porque seus cátions podem ser reduzidos catodicamente (FONTANA & GREENE, 1986).

Esses íons, em outras palavras, são receptores de elétrons. Esta é uma razão pela qual o cloreto férrico é amplamente utilizado em estudos de corrosão. As reações não são sensivelmente afetadas pela presença ou ausência de oxigênio. O pite pode ser prevenido ou reduzido em muitos casos pela presença de hidróxido, cromato ou sais de silicato. No entanto, essas substâncias tendem a acelerar o pite quando presentes em pequenas concentrações (FONTANA & GREENE, 1986).

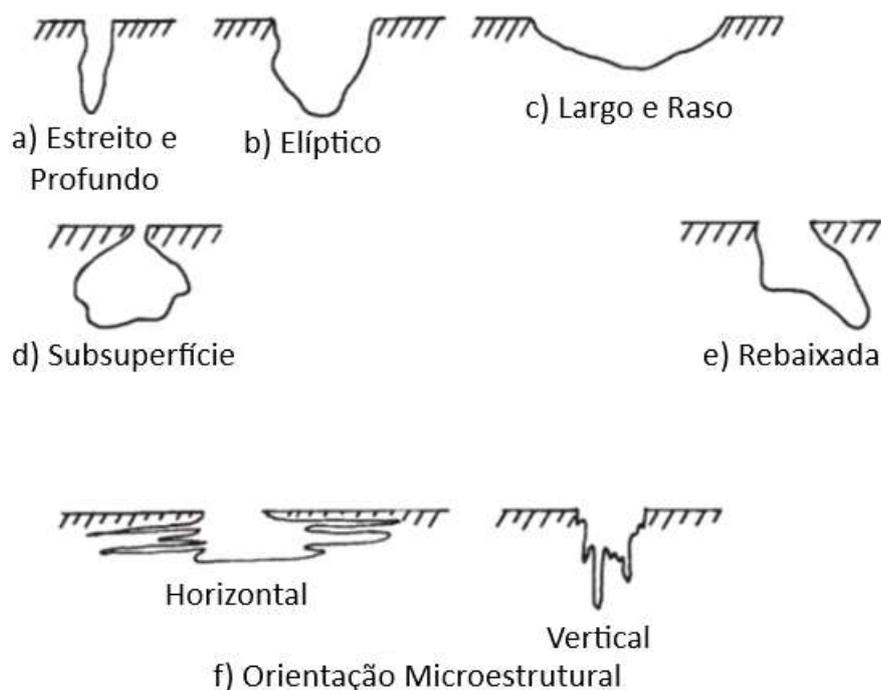
Os tipos de aço inoxidável AISI 304 e AISI 316 na faixa de temperatura de sensibilização (510°C a 788°C) têm sua resistência à corrosão reduzida. Os aços inoxidáveis austeníticos exibem a maior resistência ao pite quando aquecidos e resfriados rapidamente em solução acima de 982°C (FONTANA & GREENE, 1986).

O trabalho a frio severo aumenta o ataque do pite dos aços inoxidáveis AISI 304 em cloreto férrico. A corrosão da borda preferencial é geralmente observada na maioria dos produtos de aço inoxidável forjado (FONTANA & GREENE, 1986).

A oxidação ocorre no interior do próprio pite, levando a ter uma redução de sua superfície. A força exercida pela gravidade faz com que os pites apresentem um crescimento para baixo, com a solução na extremidade do pite tornando-se mais concentrada e densa à medida que o pite cresce. O pite pode ser inserido por meio de um defeito superficial como um arranhão ou uma pequena variação de

composição. A Figura 2 indica os diferentes tipos de corrosão por pites, demonstrando os principais formatos segundo a Norma ASTM G 46-94 de 2005 (CALLISTER, 2016).

Figura 2 - Tipos de corrosão por pite



Fonte: Adaptado de ASTM G46-94, 2005.

3.4 Corrosão por frestas

A corrosão intersticial ocorre ao longo dos contornos de grãos em algumas ligas em específico, fazendo com que este perca sua propriedade mecânica e ocasionando uma fratura caso ocorra sollicitação de esforços mecânicos. Este tipo de corrosão ocorre principalmente em alguns aços inoxidáveis (CALLISTER, 2016).

De acordo com CALDERÓN-HERNÁNDEZ (2012), o ataque se restringe às regiões do contorno de grão e às suas adjacências, em que pode haver perda de massa considerável do metal devido ao destacamento dos grãos. Para análise foram listados fatores que mais contribuem para este tipo de ataque:

- Acúmulo de impurezas;
- Precipitação de fases – geralmente com dimensões submicrométricas;
- Enriquecimento em um determinado elemento de liga;

- Empobrecimento em um determinado elemento de liga.

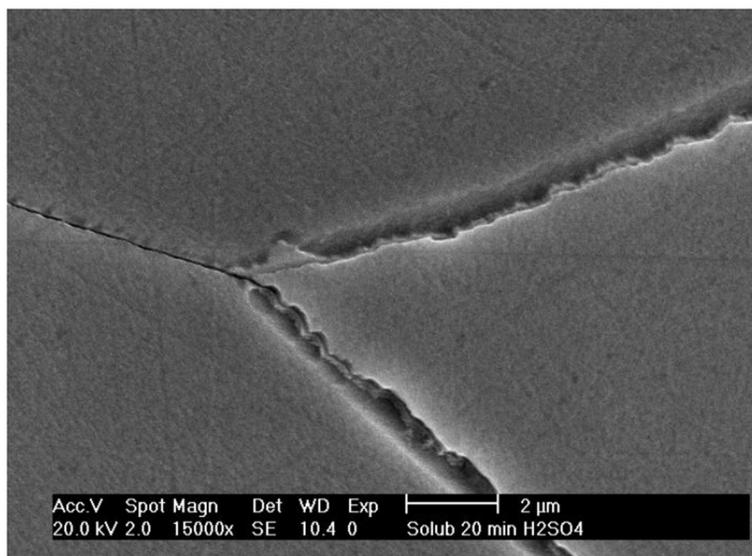
Além disso, foram listados os materiais onde o fenômeno é mais frequente:

- Alumínio – segregação de fases ricas em Fe ou em Cu em ligas de elevada resistência mecânica;
- Latões – tendência do Zn se acumular nestas regiões;
- Aço Inoxidável – empobrecimento em Cr nos contornos de grão.

A sensitização ocorre quando o aço é aquecido durante certo intervalo de tempo entre 450° e 850° C, a difusão do Carbono para os contornos de grão acontece durante o aquecimento, com enriquecimento desta região neste elemento, a difusão do Cr para o contorno de grão é muito mais lenta. Na faixa de temperatura indicada, o Cr_{23}C_6 é virtualmente insolúvel e precipita da solução sólida ($\text{C} > 0,02\%$).

O Cr é removido da solução sólida, e seu teor fica abaixo dos 10% necessários para a passivação na região adjacente aos contornos de grãos. O ataque ocorre na região empobrecida em Cr, que se torna anódica em relação ao grão e também aos carbeto – relação desfavorável de área. Um exemplo de corrosão intergranular é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Microestrutura de aço UNS S43000 após tratamento em solução em 1160 °C por 20 min. A precipitação intergranular de carbonetos de cromo podem ser notadas. Ácido utilizado: 0,5 M H_2SO_4



Fonte: Calderón-Hernández et al., 2012

3.5 Métodos para prevenção de corrosão

Como mencionado acima, o mecanismo de fissuração por corrosão por pite e por frestas já é bem compreendido. Como consequência, os métodos de prevenção desse tipo de ataque são de natureza geral ou empírica. Métodos de fissuração por corrosão por pite e por frestas: podem ser reduzidos ou evitados pela aplicação de um ou mais dos seguintes:

- Reduzir a tensão abaixo do valor limite, se houver. Isso pode ser feito por recozimento no caso de tensões residuais, espessamento da seção ou redução da carga. Os aços carbono simples podem ser recozidos com alívio de tensão entre 593° C e 649° C, e os aços inoxidáveis austeníticos são frequentemente aliviados de tensão em temperaturas que variam de 816° C a 927° C.
- Eliminar as espécies ambientais críticas por, por exemplo, desgaseificação, desmineralização ou destilação (FONTANA & GREENE, 1986).
- Mudar a liga é um recurso possível se nem o ambiente nem o estresse puderem ser alterados. Por exemplo, é comum usar Inconel (aumentando o teor de níquel) quando o aço inoxidável tipo AISI 304 não é satisfatório. Embora o aço carbono seja menos resistente à corrosão geral, é mais resistente à corrosão por pite do que os aços inoxidáveis. Assim, sob condições que tendem a produzir trincas por corrosão por pite, os aços carbono são frequentemente mais satisfatórios do que os aços inoxidáveis. Por exemplo, os trocadores de calor usados em contato com água do mar ou águas salobras são geralmente construídos em aço-carbono comum (FONTANA & GREENE, 1986).
- Aplicação de proteção catódica à estrutura com fonte de alimentação externa ou ânodos consumíveis. A proteção catódica só deve ser usada para proteger instalações onde é positivamente conhecido que a corrosão por pite é a causa da fratura, uma vez que os efeitos da fragilização por hidrogênio estão sendo acelerados por correntes catódicas (FONTANA & GREENE, 1986).
- Deve-se adicionar inibidores ao sistema, se possível. Fosfatos e outros inibidores de corrosão inorgânicos e orgânicos têm sido usados com sucesso para reduzir os efeitos de rachaduras por corrosão por pite e por frestas em meios levemente corrosivos. Como em todas as aplicações de inibidores, deve-se adicionar inibidor suficiente para evitar a possibilidade de corrosão localizada e por pite (FONTANA & GREENE, 1986).

- Revestimentos são usados às vezes, e eles dependem de manter o ambiente longe do metal – por exemplo, revestir vasos e tubos que são cobertos com isolamento. Em geral, porém, este procedimento pode ser arriscado para o metal nu (FONTANA & GREENE, 1986).
- *Shot-peening* (também conhecido como jateamento) produz tensões residuais de compressão na superfície do metal. Woelfel e Mulhall* mostram uma melhora muito substancial na resistência à corrosão como resultado do peening com esferas de vidro. O aço inoxidável tipo 410 foi exposto a 3% de NaCl à temperatura ambiente; tipo 304 a 42% MgCl₂ a 150°C; e liga de alumínio 7075-T6 a uma solução aquosa de K₂Cr₂O₇-CrO₃-NaCl à temperatura ambiente. Toda a superfície exposta do equipamento completo deve ser jateada para obter bons resultados (FONTANA & GREENE, 1986).

3.6 Normas dos testes de corrosão

Para a padronização dos resultados e avaliação dos tipos de corrosão são utilizadas as normas da ASTM. Dentre os inúmeros testes, estão presentes as normas G1, G46 e G48, cada uma dessas com sua devida importância para o presente estudo.

A norma ASTM G1-03 (2017) informa os processos de preparação, limpeza e avaliação da corrosão de espécimes ensaiadas. Os procedimentos presentes na norma foram desenvolvidos para a retirada da corrosão das amostras sem danificar significativamente o metal base. Isso permite uma determinação de perda de massa do metal ou liga que ocorreu durante a exposição ao meio corrosivo (ASTM, 2017).

Já a norma ASTM G46-21 (2021) tem como escopo o exame e avaliação de corrosão por pite. É necessária a determinação da extensão do pite para prever o restante da vida útil da estrutura metálica em aplicação ou em programas de teste para a escolha do material menos susceptível à corrosão por pite (ASTM, 2021).

Por fim a norma ASTM G48-11 (2020) possui os métodos utilizados para verificar a resistência à corrosão por pite e por fresta de aços inoxidáveis e ligas relacionadas utilizando soluções de Cloreto férrico. Dentro da norma estão presentes vários métodos para avaliação da resistência à corrosão desses aços expostos em meios oxidantes com íons cloreto (ASTM, 2020).

A ASTM G48-11 (2020) apresenta dois métodos de ensaio: Método A (*Ferric Chloride Pitting Test* ou Ensaio de Pite com Solução de Cloreto Férrico) e Método B (*Ferric Chloride Crevice Test* ou Ensaio de Frestas com Solução de Cloreto Férrico).

O Método A é usado para avaliar a corrosão por pite, enquanto o Método B é utilizado para avaliar a corrosão por frestas.

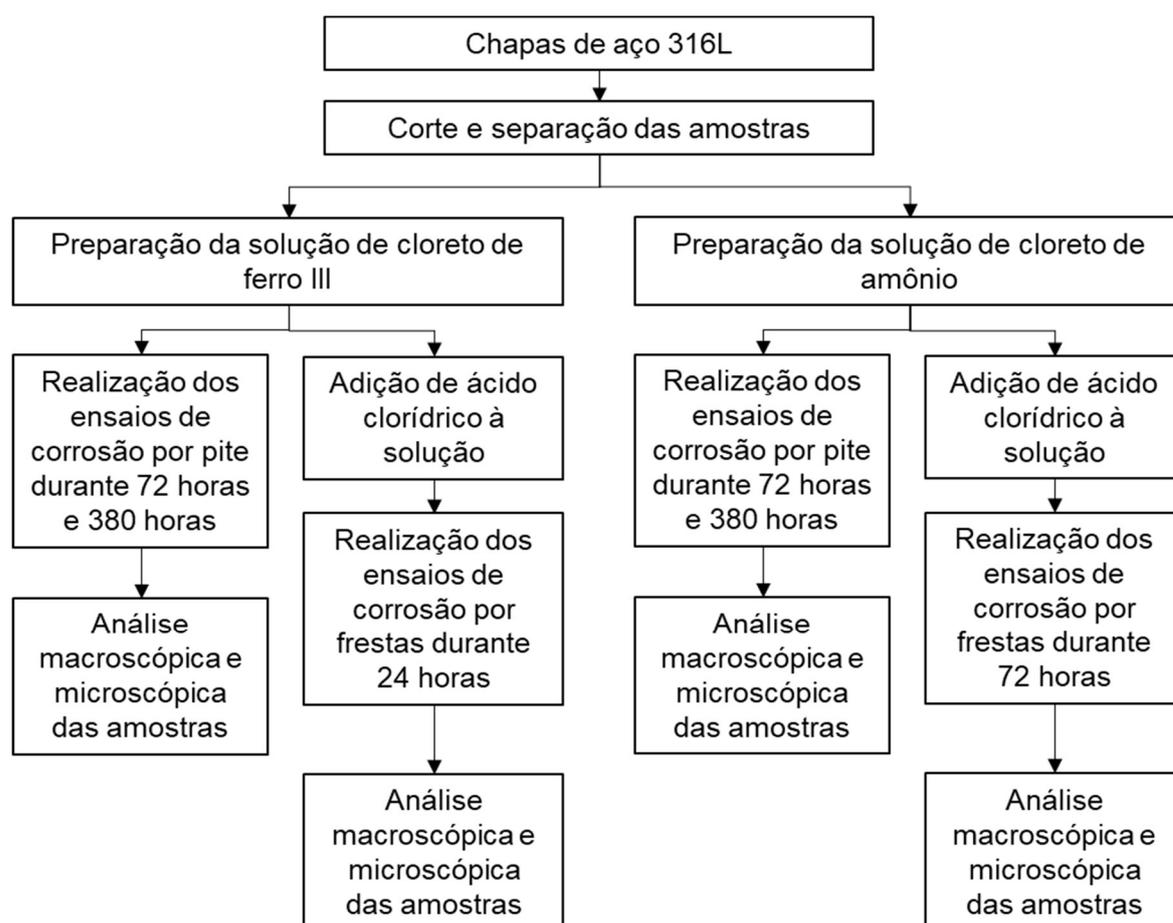
Esses métodos de ensaio são amplamente aceitos na indústria e em pesquisas científicas como uma forma padronizada e confiável de caracterizar a resistência à corrosão por pite e frestas em aços inoxidáveis. Eles permitem uma avaliação precisa da susceptibilidade dos materiais a esses mecanismos de corrosão e ajudam na seleção adequada dos aços para aplicações específicas.

Esses métodos de teste descrevem testes de laboratório para comparação da resistência dos aços inoxidáveis e ligas, relacionadas com a iniciação da corrosão por pites e frestas. Os resultados podem ser usados para classificar ligas em ordem crescente de resistência a iniciação de corrosão por pites e frestas sob condições específicas de ambiente, temperatura e pressão. Os métodos A e B são projetados para causar a fissura do Tipo AISI 304 à temperatura ambiente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo é caracterizado como uma pesquisa experimental, pois busca avaliar a resistência à corrosão por pite e intersticial no aço inoxidável AISI 316L na realização de testes de imersão variando a solução utilizada com análises microscópicas por meio de Microscopia óptica (MO). A metodologia utilizada é resumida no fluxograma presente na Figura 4 e de acordo as normas ASTM G1, ASTM G46-21 e ASTM G48-11.

Figura 4 - Fluxograma do processo experimental



Fonte: Próprio autor

4.1 Materiais

Foram adquiridas amostras de aços inoxidáveis austeníticos AISI 316L, com espessuras de 5 cm e dimensões de 20 cm por 45 cm.

A fim de testar a resistência a corrosão por pite do aço inoxidável austenítico utilizado, foram selecionadas duas soluções, a primeira de cloreto férrico III e a segunda de cloreto de amônio, para obter um grau comparativo no surgimento de pites.

Foi utilizado o meio corrosivo de cloreto de amônio, pois ele pode afetar a durabilidade e a segurança dos equipamentos e instalações da indústria petroquímica e química que utilizam aços inoxidáveis, como o AISI 316L, que é uma liga comumente empregada nesse setor. Além disso, um estudo desse tipo pode contribuir para o desenvolvimento de novas ligas ou métodos de proteção contra a corrosão por pite e por frestas, que possam aumentar a vida útil e a segurança dos equipamentos e instalações da indústria petroquímica e química.

Todas as amostras foram imersas em béqueres, as mesmas estavam limpas de acordo com a norma ASTM G1-03 e armazenadas em temperatura ambiente. A seguir segue a especificação do aço estudado, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificação técnica dos aços utilizados (% em massa)

Aço	C	Cr	Ni	Mo
316L	≤0,03	16/18	10/14	2/3

Fonte: ARCELORMITTAL, 2008. (Adaptada)

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural foi realizada por meio de análise macroscópica, através de olho nu, e microscopia óptica (MO), utilizando um microscópio óptico Fortel com aumento de 100x, sistema de digitalização Kontrol modelo LM-713 para análise das microestruturas, as imagens foram capturadas com auxílio da câmera digital MDCE-AS já acoplada ao microscópio para tratamento das imagens.

4.2.2 Testes de corrosão

Foram preparadas duas soluções, uma aquosa de cloreto férrico III ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), seguindo a norma ASTM G48-11 que rege métodos de teste padrão para resistência à corrosão por pite e frestas de aços inoxidáveis e ligas relacionadas pelo uso de solução de cloreto férrico, como solução eletrolítica para imersão das amostras. Para a classificação posterior dos pites, as medidas de profundidade, comprimento e diâmetro foram realizadas por meio de escala com precisão de centímetros.

4.2.2.1 Cloreto de amônio para ensaio de pite

Para a preparação solução de cloreto de amônio, foram utilizados 60 gramas de cloreto de amônio (NH_4Cl) diluídos em 1000ml de água destilada, a temperatura ambiente, o que proporciona uma concentração de 6% (m/v). Para a medição da massa de cloreto de amônio foi empregado a balança eletrônica analítica. Para a preparação da solução foi utilizado o sal NH_4Cl da marca NEON.

As amostras foram enumeradas de 1 a 5, a fim de comparação da área corrida posteriormente à corrosão. As amostras foram imersas em béqueres e armazenadas em temperatura ambiente. A Figura 5 mostra a distribuição das amostras de 1 a 5 logo após a imersão na solução.

Figura 5 - Amostras 1 a 5 em imersão na solução de cloreto de amônio



Fonte: Próprio autor

As amostras ficaram imersas em solução aquosa de cloreto de amônio 6% (m/v) durante 72 horas para efeito comparativo com a norma ASTM G48-11, com os béqueres devidamente fechados. Após o período de teste, as amostras foram enxaguadas com água e com auxílio de uma escova de cerdas de nylon para retirada dos produtos de corrosão, passadas em álcool etílico e, por fim secas ao ar. Visto que após as 72 horas foram observados poucos resultados de corrosão, as amostras ficaram imersas em solução durante 380 horas. Estes procedimentos foram adotados para entrarem de acordo com as normas ASTM G1-03 (2017).

4.2.2.1.1 Adição de ácido clorídrico para ensaio de frestas

Na intenção de obter um comparativo com a norma ASTM G48-11, foi realizado o mesmo processo só que com cloreto de amônio e ácido clorídrico, tendo sido obtida uma solução de 6% NH_4Cl e 1% HCl . As amostras 13 e 14 foram imersas nos béqueres com os suportes poliméricos e presas por meio de elásticos, assim como apresentado na Figura 6, ficando cobertas com plástico filme PVC durante 24 horas. Porém após esse tempo, não houve corrosão aparente na superfície do material, então a imersão continuou até um período total de 72 horas. O ácido clorídrico foi adicionado para que o ataque corrosivo ocorrido fosse mais rápido e não houve inclinação das amostras durante o ensaio.

Figura 6 - Disposição das amostras 13 e 14 no ensaio de corrosão por frestas



Fonte: Próprio autor

4.2.2.2 *Cloreto de ferro III para ensaio de pite*

Já para a solução de cloreto férrico III, foram utilizados 100 gramas de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ da marca DINAMICA QUÍMICA, diluídos em 900 ml de água destilada, para que se obtenha uma concentração de 6% (m/v).

As soluções foram colocadas em balões volumétricos para mistura homogênea e armazenamento das soluções. Assim como realizado nas amostras em solução de cloreto de amônio, as amostras não foram polidas, com intuito de simular uma situação real de estresses do material.

As amostras foram imersas em béqueres e armazenados em temperatura ambiente. Após o tempo de ensaio, elas foram enumeradas de 6 a 10, a fim de comparação da área corrida posteriormente à corrosão. A Figura 7 mostra a distribuição das amostras de 6 a 10 logo após a imersão na solução.

Figura 7 - Amostras 6 a 10 em imersão na solução de cloreto férrico III



Fonte: Próprio autor

As amostras ficaram imersas em solução aquosa de cloreto férrico III com concentração de 6%(m/v) durante 72 horas de acordo com a norma ASTM G48-11, com os béqueres devidamente fechados. Após o período de teste, as amostras foram enxaguadas com água e com auxílio de uma escova de cerdas de nylon em água corrente para retirada dos produtos de corrosão, passadas em álcool etílico e por fim, secas ao ar. Estes procedimentos foram adotados para entrarem de acordo com as normas ASTM G1-03 (2017) e ASTM G48-11 (2020), a qual avalia a susceptibilidade à corrosão por pite. Para efeito comparativo as amostras imersas em cloreto de ferro III também ficaram imersas durante um tempo total de 380 horas.

4.2.2.2.1 Adição de ácido clorídrico para ensaio de frestas

Para os ensaios de corrosão por frestas foi utilizado o método B da norma ASTM G48-11, que consiste na preparação de uma solução com 600 ml de solução aquosa de cloreto de ferro III com concentração de 6%(m/v). Além disso, foi realizada a adição de 16 ml de reagente concentrado (36,5% – 38,0 %) de ácido clorídrico (HCl) para obtenção de uma solução com 6% FeCl em massa e 1% HCl resultando em um pH controlado de 1. Para este ensaio, foram utilizadas as Amostras 11 e 12, que ficaram imersas durante 24 horas e foram devidamente avaliadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no teste de corrosão por pite após 72 horas mostraram a alta resistência à corrosão do aço inoxidável 316L. Após esse período, tanto as amostras imersas em cloreto de ferro III quanto as imersas em cloreto de amônio não apresentaram grande número de pites. As amostras imersas em cloreto de amônio são apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Resultados das amostras imersas em cloreto de amônio após 72 horas



Fonte: Próprio autor

Já nas amostras imersas por 72 horas em cloreto de ferro III foram observados poucos pites, porém já mais aparentes que em comparação às imersas em cloreto de amônio. Isso é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Resultado das amostras imersas em cloreto de ferro III após 72 horas



Fonte: Próprio autor

Visto que não houve corrosão aparente, principalmente nas amostras em contato com o cloreto de amônio, as amostras ficaram em imersão durante um tempo

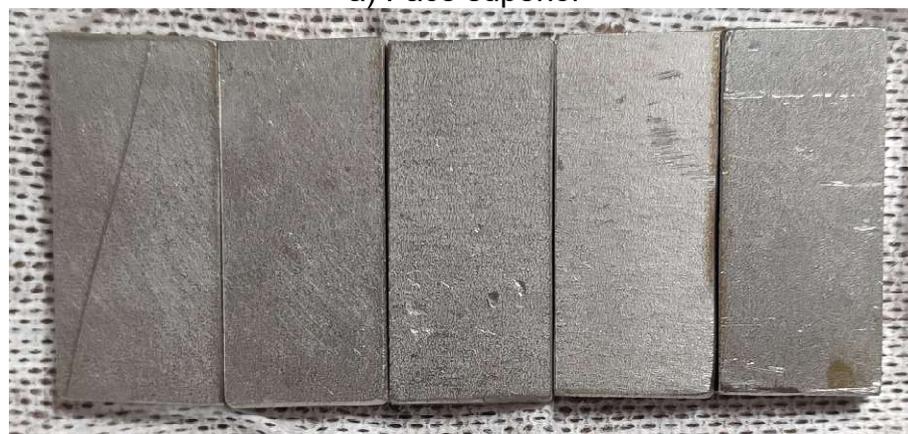
total de 15 dias (380 horas) para a obtenção de imagens mais expressivas. Após as amostras serem lavadas em água corrente e secas em papel até que não houvesse mais ácido nas amostras, foram realizadas uma avaliação prévia dos pites a olho nu e foram registradas imagens macroscópicas das amostras. A Figura 10 e a Figura 11 mostram as condições vistas.

Já na visão macroscópica, foi possível observar uma maior agressividade do cloreto de ferro III em comparação ao cloreto de amônio. Para obter um resultado mais conclusivo, as amostras foram levadas ao microscópio óptico. Para isso, enumerou-se as amostras no cloreto de amônio de 1 a 5 e as amostras no cloreto de ferro III de 6 a 10.

Figura 10 - Amostras 1 a 5, frente e verso, após imersão de 380 horas em cloreto de amônio



a) Face superior



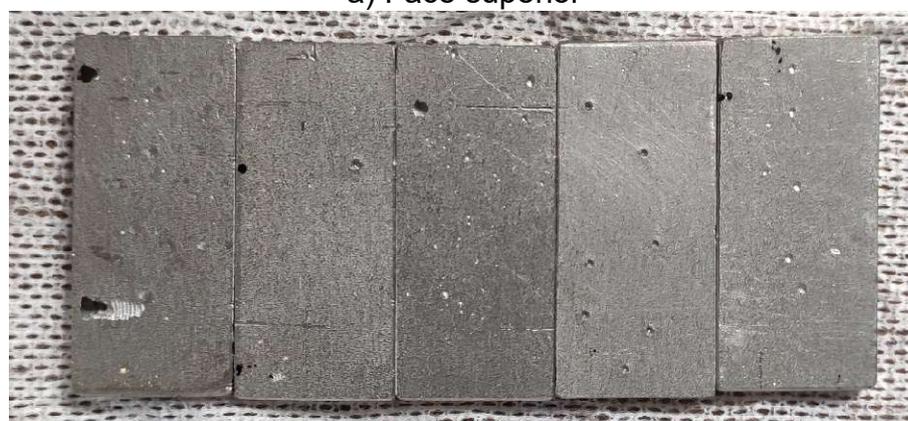
b) Face inferior

Fonte: Próprio autor

Figura 11 - Amostras 6 a 10, frente e verso, após imersão de 380 horas em cloreto de ferro III



a) Face superior



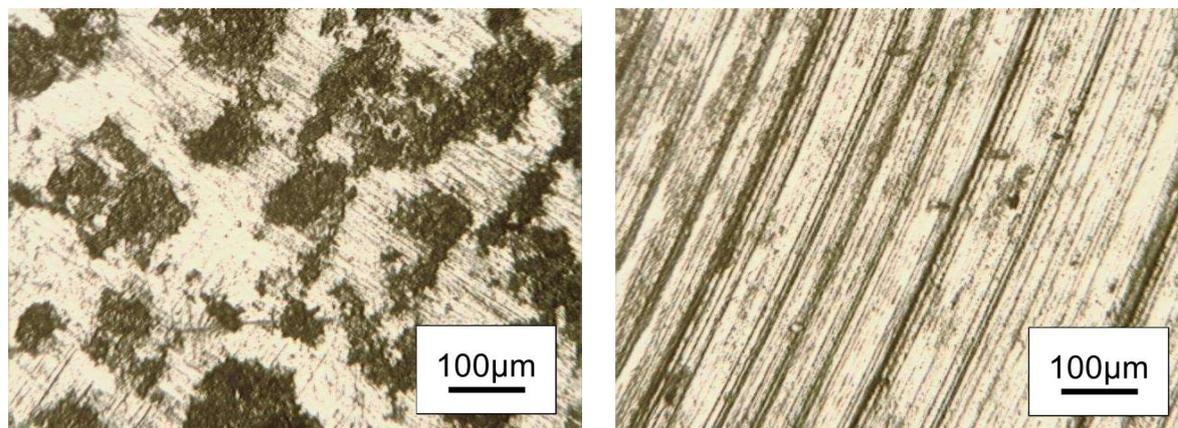
b) Face inferior

Fonte: Próprio autor

Foi realizada uma amostra de controle, demonstrada na Figura 12, que não passou por nenhum ensaio, a fim de verificar os efeitos corrosivos dos meios e compará-los com a situação inicial do material. A amostra de controle também serve como referência para avaliar a morfologia e a localização da corrosão nas amostras testadas, usando técnicas de análise de superfície.

Em comparação com a literatura, a amostra de controle apresentou inconformidades, como os micro pites na área laminada, possivelmente devido ao processamento prévio por qual ela passou. Já na área cortada, não foram vistos micro pites provavelmente por ter sido um corte recente e resfriado por líquido arrefecedor, retardando a formação de corrosão na superfície do material.

Figura 12 - Microscopias da amostra de controle na face laminada e cortada



a) Amostra de controle na face laminada b) Amostra de controle na face cortada
Fonte: Próprio autor

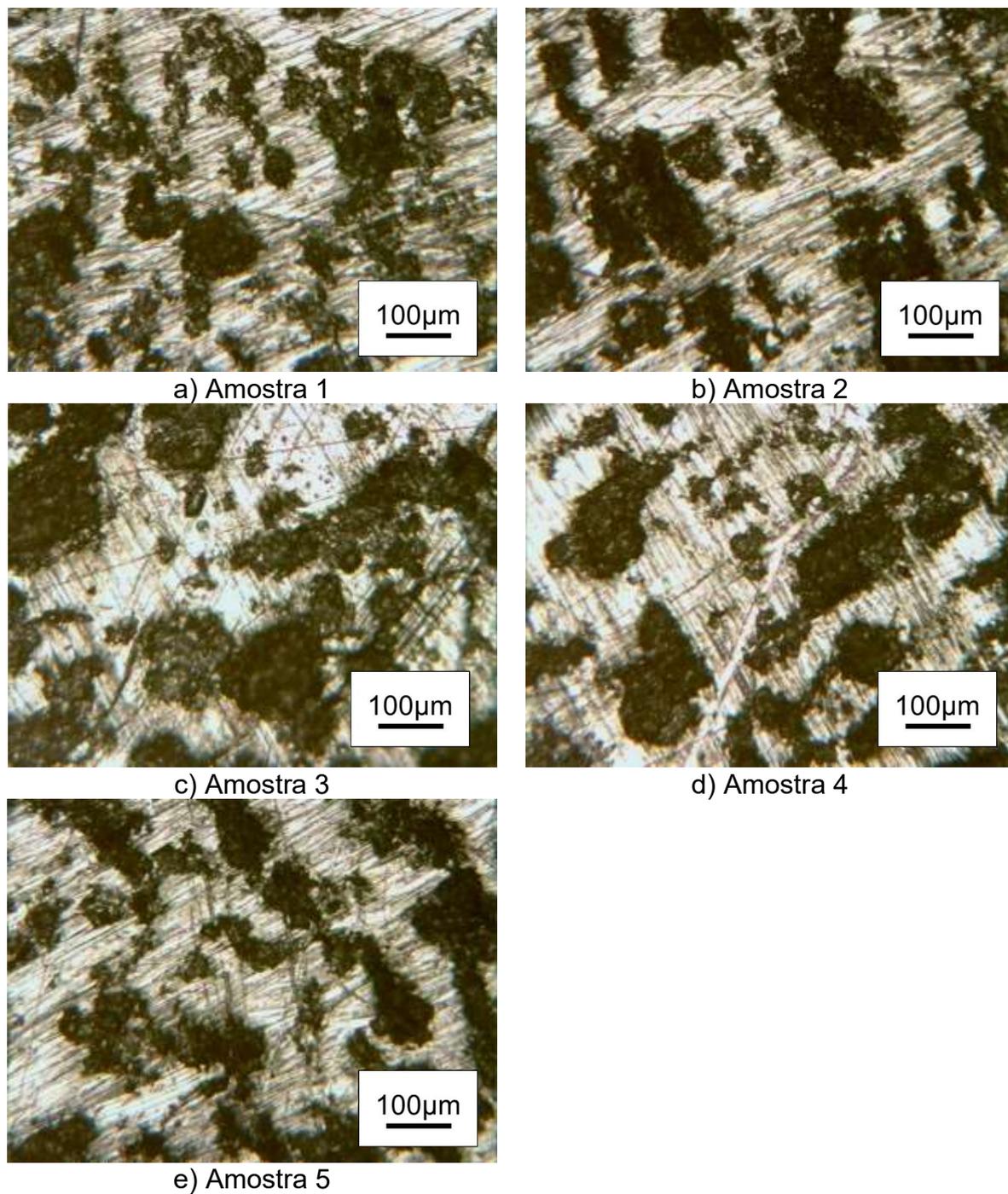
Para um efeito comparativo foram capturadas imagens na área cortada das amostras corroídas pelo cloreto de ferro III por apresentar pites nessa seção e ter partido de um processo de corte, obtendo-se um aspecto mais rugoso, caracterizado como cortado, e na face com menor rugosidade e caracterizado como laminado.

O estudo de Vignal (2021) avalia a corrosão por pite na microestrutura do aço austenítico AISI 316L após fusão seletiva a laser, nele é apresentado micrografias da superfície do aço em diferentes métodos de fusão que evidenciam a corrosão pré-existente na amostra de controle deste trabalho.

De acordo com Nicacio (2023), a corrosão causada pelo cloreto de amônio é um processo eletroquímico que ocorre devido à presença do íon cloreto (Cl^-) no composto. O íon cloreto é um agente agressivo que pode atacar muitos tipos de metais, especialmente aqueles que são mais suscetíveis à corrosão, como o ferro e o aço carbono, e até mesmo os aços inoxidáveis são suscetíveis a esse tipo de corrosão

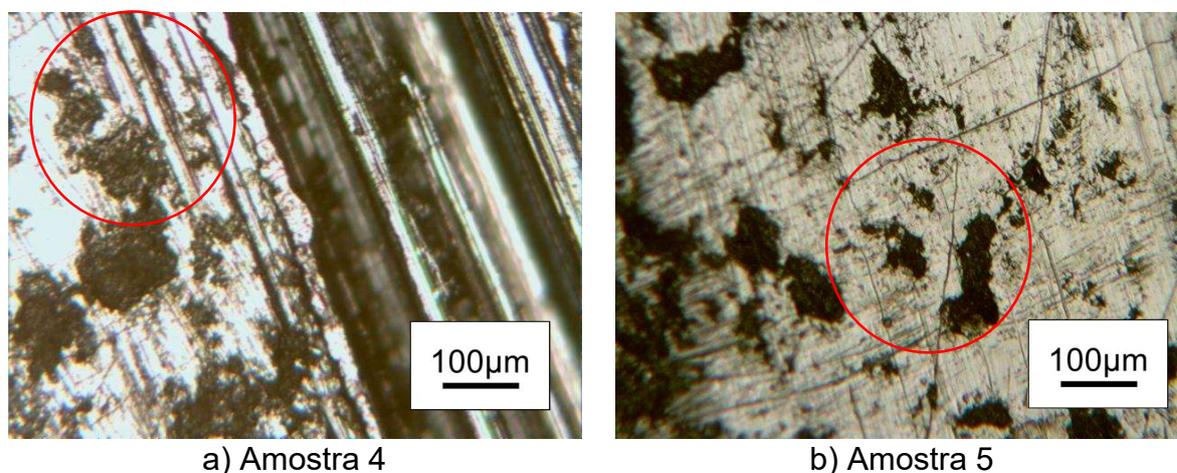
Mesmo após as 380 horas, não houve pites visíveis à olho nu nas amostras imersas em cloreto de amônio, porém houve a ocorrência de estrias na superfície das amostras. As imagens capturadas pelo microscópio óptico na face das amostras de cloreto de amônio mostraram que não houve formação de pites, como evidenciado na Figura 13, porém nas amostras 4 e 5, na mancha de cor marrom, houve uma mudança da morfologia da face, conforme Figura 14.

Figura 13 - Microscopia das amostras 1 a 5 após 380 horas de imersão em cloreto de amônio



Fonte: Próprio autor

Figura 14 - Microscopia da mancha das amostras 4 e 5 após 380 horas de imersão em cloreto de amônio



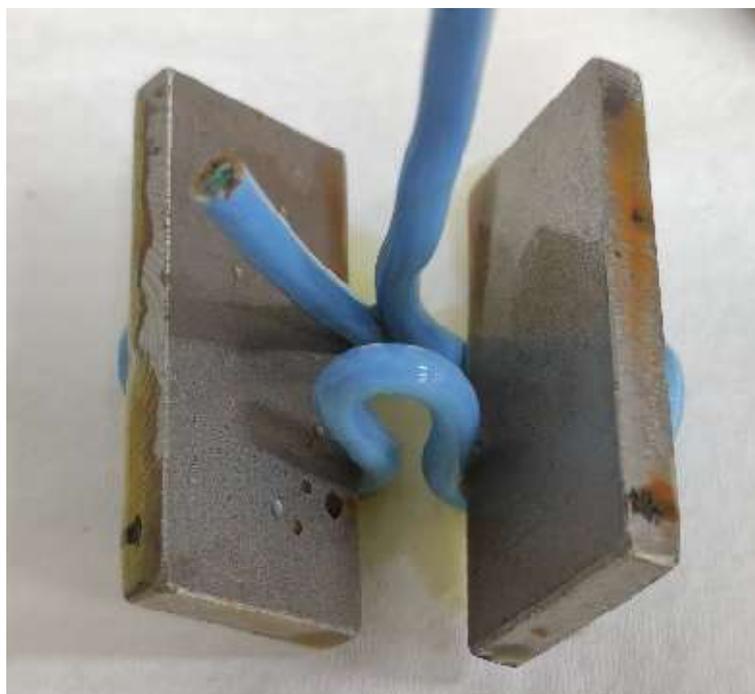
Fonte: Próprio autor

Não foram apresentados grandes pites nas manchas encontradas, possivelmente sendo alguma gordura que ficou presa na superfície das amostras.

Quando o cloreto de amônio entra em contato com um metal, ocorre a formação de uma solução aquosa contendo íons cloreto. Esses íons podem reagir com a superfície do metal, causando corrosão. A reação eletroquímica geralmente envolve a oxidação do metal, em que os íons metálicos são convertidos em íons metálicos carregados positivamente (cátions) e liberam elétrons. A presença de cloreto de amônio aumenta a taxa de corrosão, pois os íons de cloreto facilitam o transporte de elétrons na solução, acelerando as reações de oxidação no metal. Além disso, a corrosão também pode ser agravada pela presença de umidade, pois a água é necessária para facilitar as reações químicas envolvidas no processo corrosivo (NICACIO, 2023).

Já nas amostras 6 a 10 imersas em cloreto de ferro III, houve formação de grandes pites além de um ataque corrosivo agressivo nas laterais em que ficaram viradas para cima durante a imersão, conforme Figura 15, capturada ainda nas 72 horas de ensaio e Figura 16, capturada após 380 horas de ensaio.

Figura 15 - Pite apresentado na lateral superior de uma amostra em cloreto de ferro III após 72 horas



Fonte: Próprio autor

Figura 16 - Pites apresentados na lateral superior das amostras 6 a 10 imersas em cloreto de ferro III após 380 horas

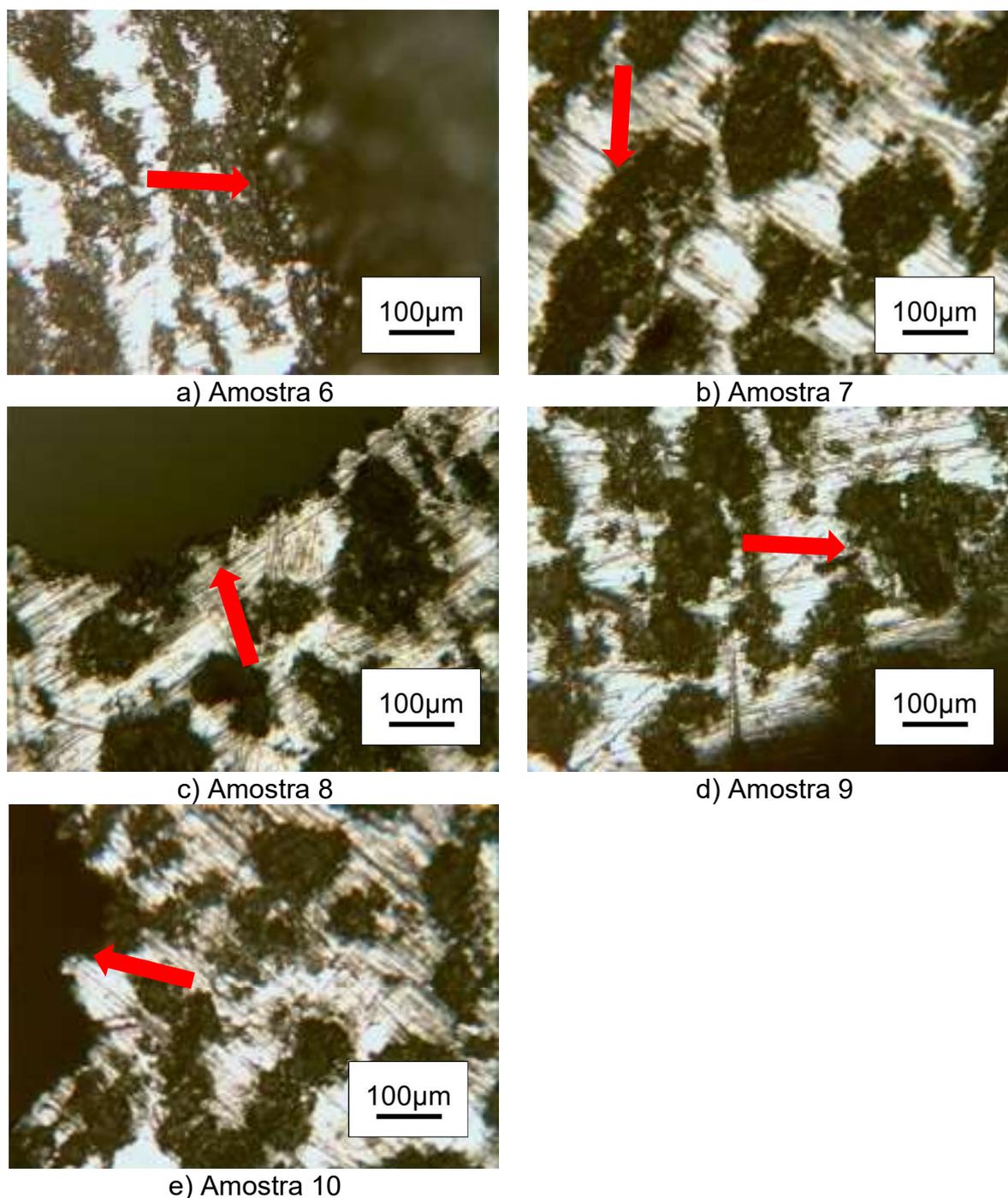


Fonte: Próprio autor

Foram capturadas imagens microscópicas tanto das faces e laterais, quanto do interior dos grandes pites para verificar a morfologia do material após o ataque corrosivo dos meios. As imagens são apresentadas nas Figura 17, Figura 18 e Figura 19.

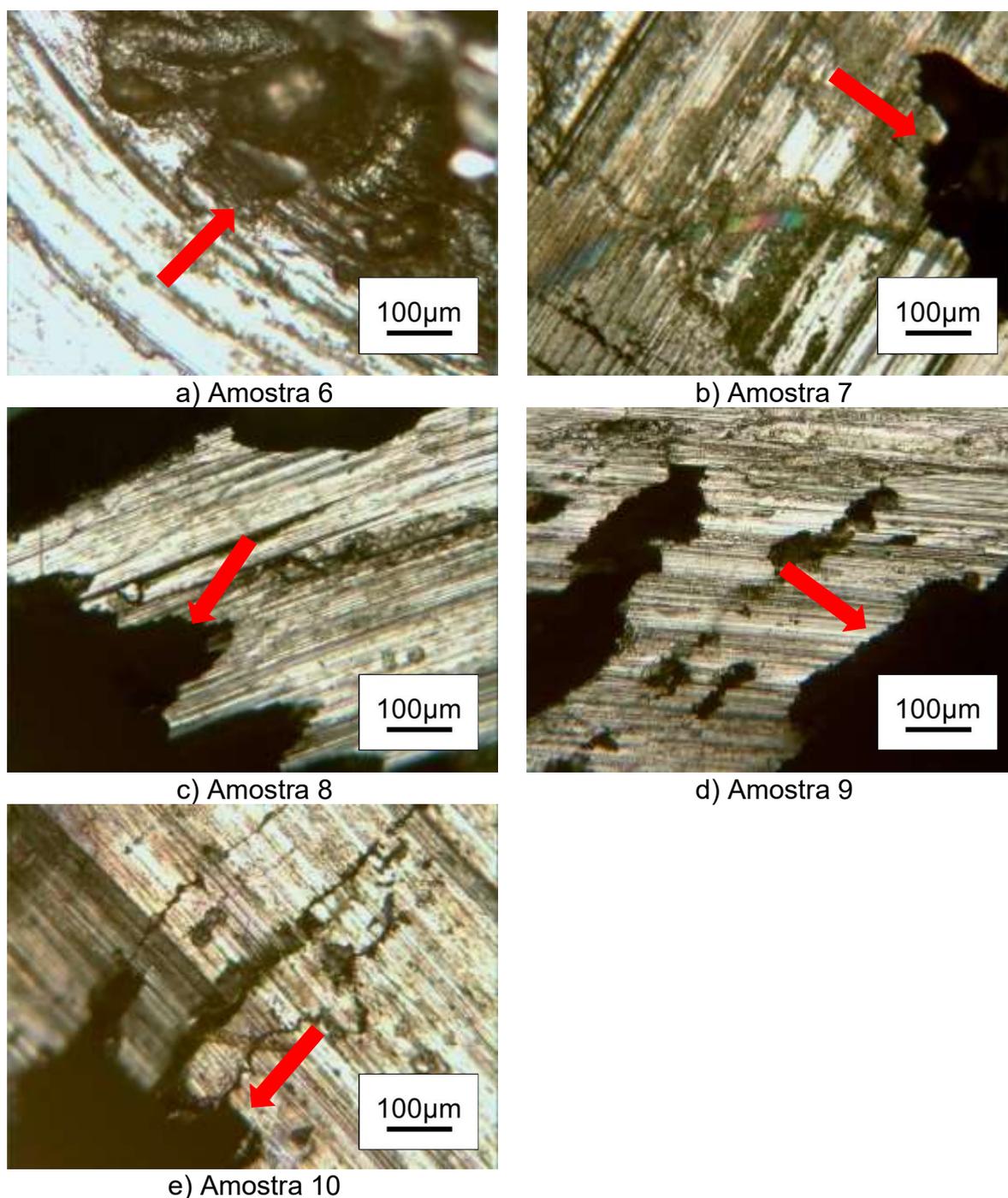
Os pites apresentados na área laminada foram classificados de acordo com a norma G46-95, em geral, como elípticos e apresentaram em média um diâmetro de 2,0 mm e profundidade de 1,0 mm, porém na amostra 6 houve uma classificação como largo e raso com um comprimento de 8,0 mm.

Figura 17 - Microscopia da área laminada das amostras 6 a 10 após 380 horas de imersão em cloreto de ferro III



Fonte: Próprio autor

Figura 18 - Microscopia da área cortada das amostras 6 a 10 após 380 horas de imersão em cloreto de ferro III

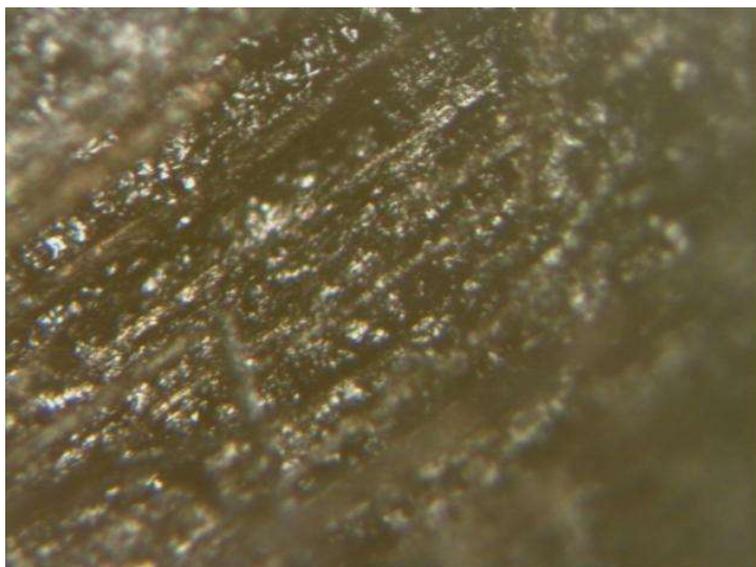


Fonte: Próprio autor

É necessário comparar o efeito de borda dos corpos de prova testados para confirmar o efeito do acabamento da superfície sobre a corrosão por pite. Nas superfícies cortadas, houve um ataque corrosivo maior por conta da rugosidade ser maior nessa região, proporcionando o maior acúmulo de íons cloreto e

consequentemente maior corrosão do material. É possível ver também os veios de corte e trincas no material. Os pites apresentados foram classificados como “*undercutting*”, com um diâmetro médio de 3,0 mm e profundidades de 3,0 a 4,0 mm. Para os testes de corrosão por frestas, foram obtidos os resultados após 24 horas de imersão em cloreto de ferro III e ácido clorídrico, como mostrado na

Figura 19 - Microscopia do interior do pite da amostra 7 após 380 horas de imersão em cloreto de ferro III



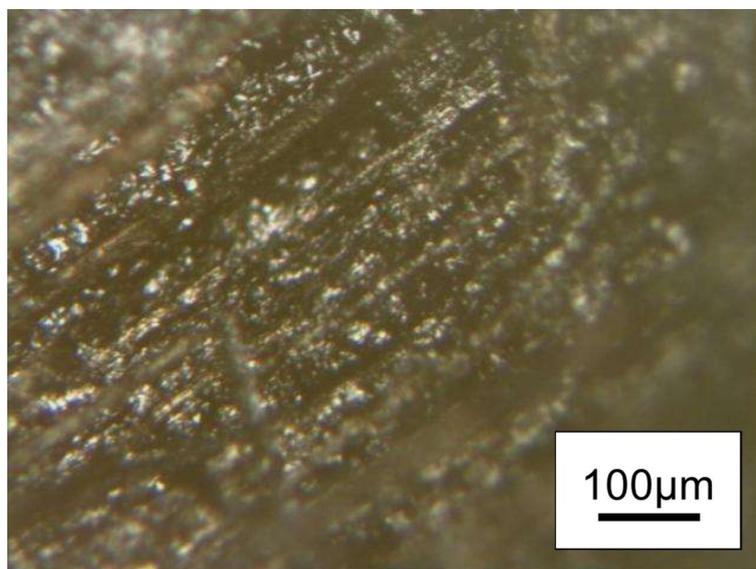
Fonte: Próprio autor

Figura 20. Estes apresentaram resultados proveitosos, evidenciando grande corrosão em torno do dispositivo.

Este ataque pode ter sido produzido pelo aumento da concentração de íons cloreto no meio corrosivo, o que causou uma maior interação da superfície da amostra com estes íons gerando carbonetos e sendo arrancados, deixando uma nova camada de aço na superfície causando um efeito cascata.

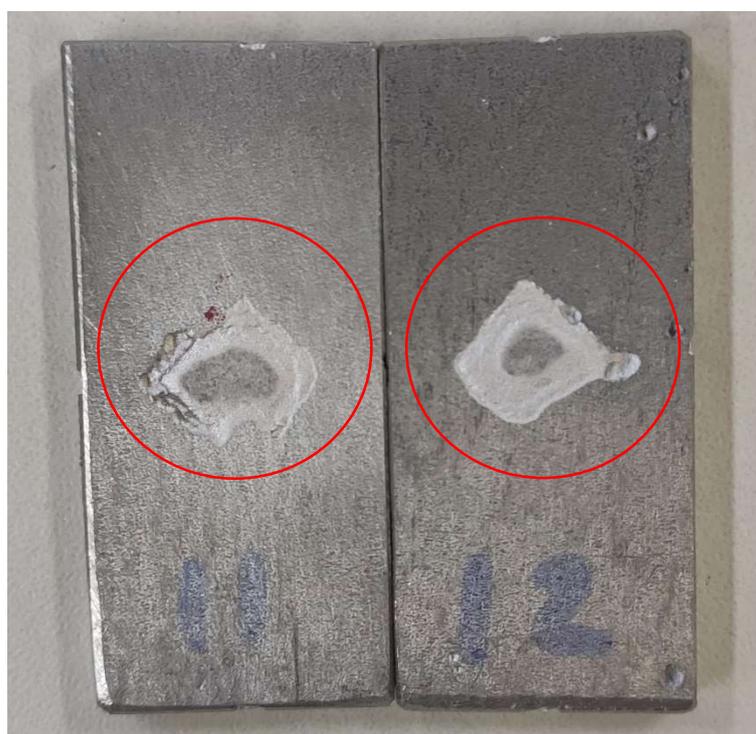
Nas amostras que ficaram em imersão de cloreto de amônio e ácido clorídrico não obtiveram resultados após 24 horas, conforme Figura 21, então ficaram em imersão por um período de 120 horas para verificação da resistência à corrosão.

Figura 19 - Microscopia do interior do pite da amostra 7 após 380 horas de imersão em cloreto de ferro III



Fonte: Próprio autor

Figura 20 - Amostras 11 e 12 após imersão de 24 horas em cloreto de ferro III e ácido clorídrico para ensaio de corrosão por frestas



Fonte: Próprio autor

Figura 21 - Amostras 13 e 14 após imersão de 24 horas em cloreto de amônio e ácido clorídrico para ensaio de corrosão por frestas



Fonte: Próprio autor

Após o período estendido de 120 horas, as amostras 13 e 14 também não apresentaram corrosão aparente, conforme Figura 22, e foram levadas ao microscópio óptico para melhor visualização do efeito corrosivo dos meios.

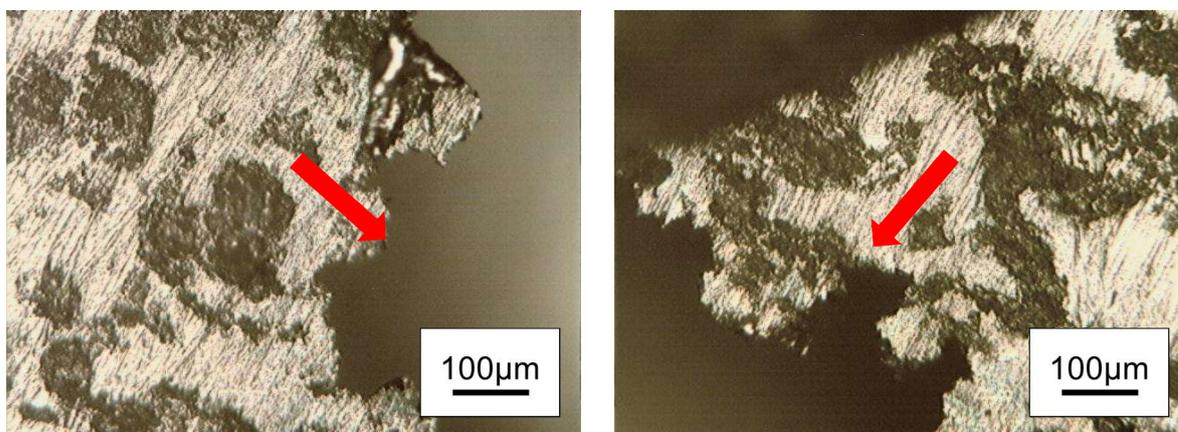
Figura 22 - Amostras 13 e 14 após imersão de 120 horas em cloreto de amônio e ácido clorídrico para ensaio de corrosão por frestas



Fonte: Próprio autor

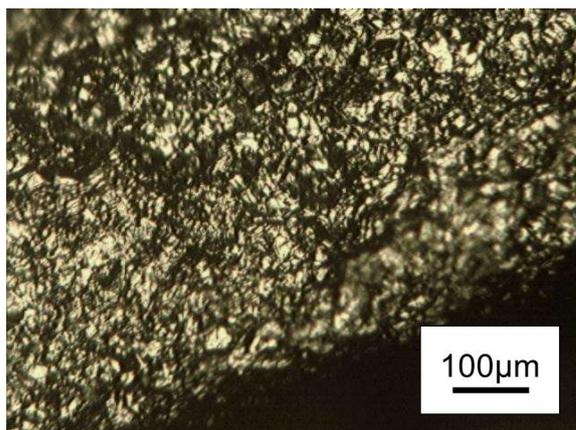
A Figura 23 apresenta as micrografias das amostras 11, 12, 13 e 14 em que demonstram as regiões que ficaram em contato com o dispositivo de fixação.

Figura 23 - Micrografias das amostras 11 e 12 após 24 horas e amostras 13 e 14 após 120 horas na área de contato com o dispositivo polimérico

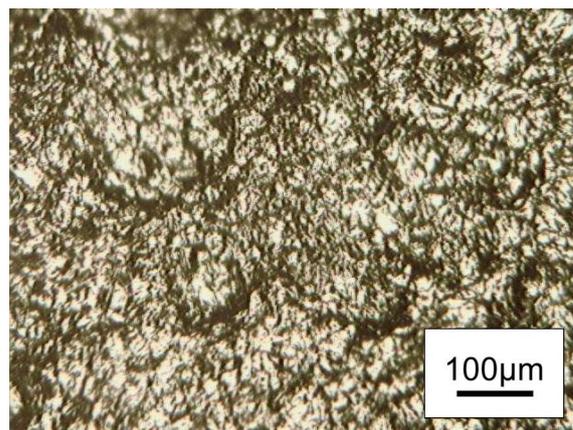


a) Amostra 11 próximo à corrosão

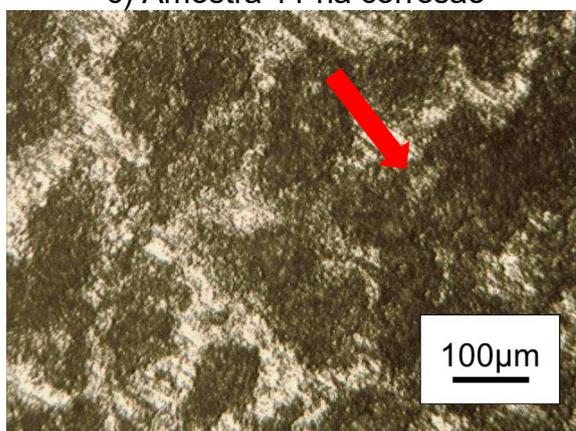
b) Amostra 12 próximo à corrosão



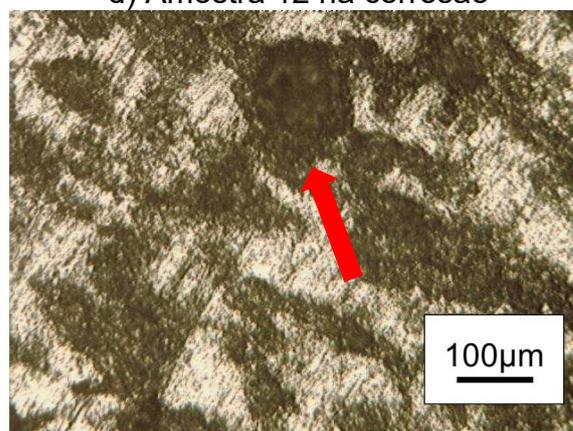
c) Amostra 11 na corrosão



d) Amostra 12 na corrosão



e) Amostra 13 na área de contato



f) Amostra 14 na área de contato

Fonte: Próprio autor

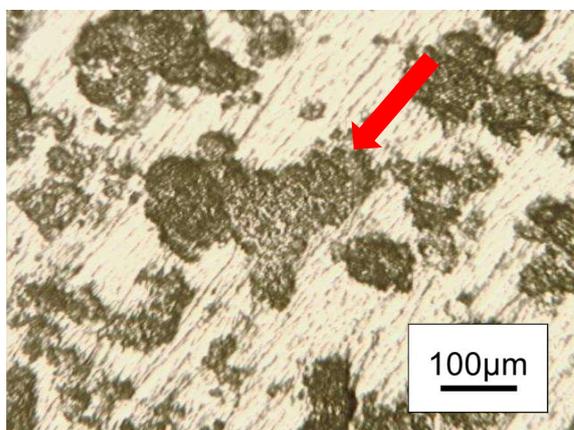
A partir disto, foi verificado a presença de produto de corrosão nas amostras 11 e 12, que ficaram imersas em solução de cloreto de ferro III e ácido clorídrico, enquanto as amostras 13 e 14, que ficaram imersas em solução de cloreto de amônio e ácido clorídrico, não apresentaram grande corrosão.

Segundo o estudo de Santos (2019) o aço inoxidável AISI 316L foi submetido a ensaios de corrosão por frestas em soluções de cloreto de ferro III e cloreto de amônio, e os resultados mostraram que o cloreto de ferro III foi mais agressivo ao aço do que o cloreto de amônio. O cloreto de ferro III causou uma maior perda de massa, uma maior profundidade de penetração e uma maior área de ataque nas amostras do que o cloreto de amônio. Além disso, o cloreto de ferro III provocou uma maior variação do potencial de corrosão e da resistência de polarização das amostras do que o cloreto de amônio, indicando uma maior atividade eletroquímica e uma menor resistência à corrosão do aço nesse meio.

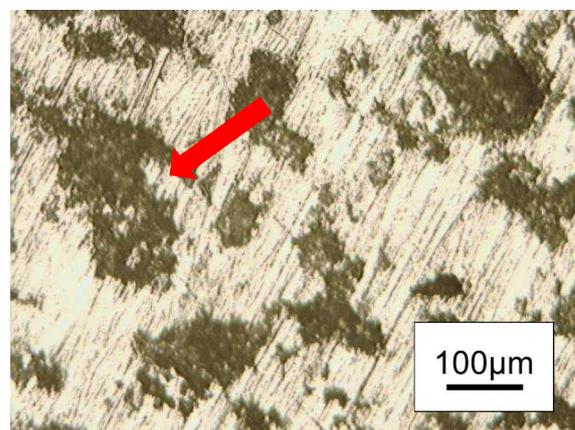
Entretanto, ao analisar as áreas que não estavam em contato com o dispositivo, foi observado que houve maior corrosão nas amostras 13 e 14 enquanto

nas amostras 11 e 12 não foi observado grande corrosão, como evidenciado na Figura 24.

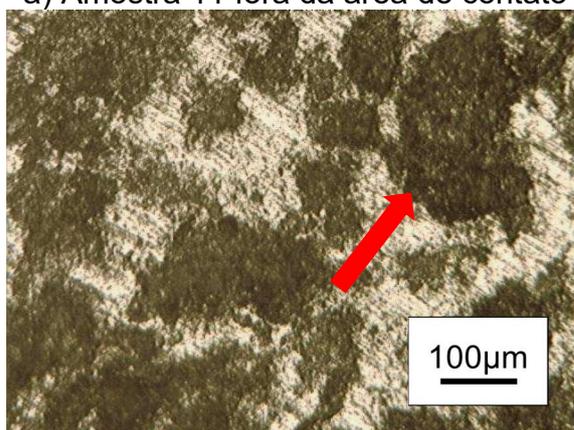
Figura 24 - Micrografias das amostras 11 e 12 após 24 horas e amostras 13 e 14 após 120 horas fora da área de contato com o dispositivo polimérico



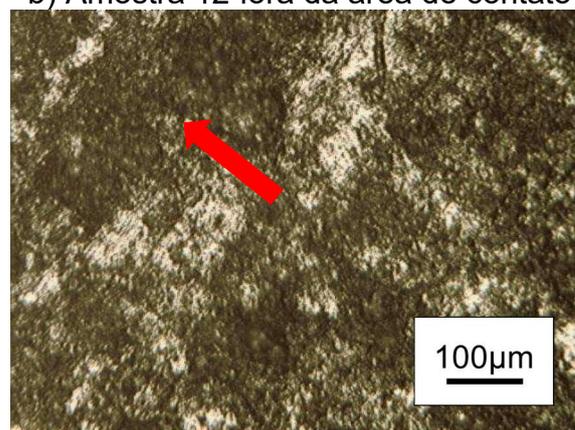
a) Amostra 11 fora da área de contato



b) Amostra 12 fora da área de contato



c) Amostra 13 fora da área de contato



d) Amostra 14 fora da área de contato

Fonte: Próprio autor

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a comparação na resistência à corrosão por pite e por frestas do aço inoxidável austenítico 316L em meios corrosivos contendo cloreto de amônio (NH_4Cl) e cloreto de ferro III (FeCl_3) na concentração de 6% (m/v).

O cloreto de ferro III foi utilizado por ser padronizado de acordo com a ASTM G48-11 e o cloreto de amônio foi utilizado por estar associado aos contaminantes presentes na refinaria de petróleo.

As amostras de aço 316L apresentaram maior resistência à corrosão na imersão em solução de cloreto de amônio, em que foi observado estrias à olho nu e micro pites rasos no microscópio óptico, e não foram apresentadas frestas no segundo ensaio após 24 horas.

Já para as amostras ensaiadas na imersão em cloreto de ferro III, houve maior ataque do meio corrosivo, em que os pites localizados na área laminada foram classificados como elípticos e na área cortada classificados como “*undercutting*”, e apresentaram frestas já nas 24 horas do segundo ensaio.

A influência dos íons cloretos mostrou-se forte quanto à formação de pites, pois enquanto o cloreto de ferro III liberou 3 íons cloreto por mol, o cloreto de amônio liberou 1 íon cloreto por mol no meio.

A mitigação eficaz da corrosão por pites e frestas em aços 316L requer uma abordagem mista que considere fatores ambientais, seleção de materiais, controle de tensões e a implementação de práticas de monitoramento e manutenção. Ao adotar essas estratégias, é possível aumentar significativamente a resistência à corrosão e prolongar a vida útil dos componentes fabricados com aço inoxidável 316L em ambientes corrosivos.

Como sugestão de pesquisas futuras, pode-se repetir os ensaios realizados com a variação da concentração de cloreto de amônio para 3 vezes maior, com intuito de igualar a concentração de íons cloreto e verificar a atuação dos outros íons.

REFERÊNCIAS

ASTM G1-03(2017), **Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM G46-94 (2005), **Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

ASTM G48-11(2020), **Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

CALDERÓN-HERNÁNDEZ, J. W.; HINCAPIE-LADINO, D.; OLIVEIRA, M. P.; ALONSO-FALLEIROS, N. **CORROSÃO INTERGRANULAR**. [S. l.]: EMCR, 2012. 23 p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3486839/mod_resource/content/1/Aula%2010_Intergranular_2017.pdf. Acesso em: 13 out. 2023.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Ed 9. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

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

D&D COATINGS (ed.). **What is Pitting Corrosion?** [S. l.], 26 maio 2019. Disponível em: <https://www.ddcoatings.co.uk/2276/what-is-pitting-corrosion>. Acesso em: 10 out. 2023.

Fontana & Greene. **Corrosion Engineering**. McGraw-Hill Book Company 1986. ISSF – International Stainless Steel Forum. **The Stainless Steel Family**. Brussels, ISSF, 2019. Disponível em: <https://www.worldstainless.org/about-stainless/what-are-stainless-steels/stainless-steel-standards/>. Acesso em: 25/05/2022.

LESSA, C. **QUALIFICAÇÃO MECÂNICA E METALÚRGICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM FHPP APLICADO NO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX SAF 2205**. 2016. 123 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MERAZ, E. del A.; CODARO, E. N.; CARVALHO, E. F. de; ROSA, J. L.; HEIN, L. R. de O.; RIBEIRO, R. B. **Análise Morfológica de Pites em Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304 Submetidos à Exposição em Via Névoa Salina**. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, v. 6, n. 1esp, p. 33–41, 2017. DOI: 10.47385/cadunifoa.v6.n1esp.1133.

Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/1133>. Acesso em: 3 jul. 2022.

MOREIRA, T. **Avaliação da resistência à corrosão dos aços inoxidáveis AISI 409, AISI 439, AISI 441 em solução simulada do condensado do gás de exaustão.** Orientador: Marcello Rosa Dumont. 2022. 73 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia de materiais) - Centro Federal de Educação tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <https://www.eng-materiais.bh.cefetmg.br/trabalhos-de-conclusao-de-curso-2022-2o/>. Acesso em: 21 ago. 2023.

NICACIO, J.; OLIVEIRA, F.; DUMONT, M. **Failure analysis and electrochemical testing of ammonium chloride corrosion in a heat exchanger in a diesel hydrotreating unit of a petroleum refinery.** Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630723007124>. Acesso em: 12/12/2023.

RIBEIRO, R.B.; Análise morfológica de pites em aços inoxidáveis ABNT 304 e 310S submetidos à exposição em névoa salina. Tese de doutoramento em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais. Faculdade do Campus de Guaratinguetá - Universidade Estadual Paulista, UNESP. Guaratinguetá, 2004, 256p.

SANTOS, T.; SANTOS, R.; MARTINS, W.; NASCIMENTO, C. **Avaliação da susceptibilidade à corrosão de um aço inoxidável AISI 316L submetido à simulação térmica com o uso da Gleeble.** São Luiz, 2019. Disponível em: scielo.br/j/rmat/a/rSpPtYbHCDWZmz3pDVb3J4K/?format=pdf. Acesso em: 12/12/2023.

SHREIR, L. L., JARMAN, R. A., BURSTEIN, G. T., **Corrosion –Metal Environment Reactions**, Vol.1, 3^a. ed., 1994;

VIGNAL, V.; VOLTZ, C.; THIEBAUT, S.; DEMESY, M.; HEINTZ, O.; GUERRAZ, S. **Pitting Corrosion of Type 316L Stainless Steel Elaborated by the Selective Laser Melting Method: Influence of Microstructure.** France, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-021-05621-7>. Acesso em: 11/12/2023.