

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DANIELLA BORBA VILELA BORGES

AVALIAÇÃO DA CORROSÃO POR PITE NO AÇO INOXIDÁVEL
SUPERMARTENSÍTICO COM DIFERENTES ACABAMENTOS SUPERFICIAIS EM
MEIO AERADO

BELO HORIZONTE

2017

DANIELLA BORBA VILELA BORGES

AVALIAÇÃO DA CORROSÃO POR PITE NO AÇO INOXIDÁVEL
SUPERMARTENSÍTICO COM DIFERENTES ACABAMENTOS SUPERFICIAIS EM
MEIO AERADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais

Orientador: Marcello Rosa Dumont

Coorientador: Mario José Bueno de Souza Freitas

BELO HORIZONTE

2017

DANIELLA BORBA VILELA BORGES

AVALIAÇÃO DA CORROSÃO POR PITE NO AÇO INOXIDÁVEL
SUPERMARTENSÍTICO COM DIFERENTES ACABAMENTOS SUPERFICIAIS EM
MEIO AERADO

Aprovado em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcello Rosa Dummont

Prof. Me. Mario José Bueno de Souza Freitas

Prof^a. Dr^a. Ivete Peixoto Pinheiro

RESUMO

O pré-sal, a ambiente no qual é extraído petróleo, possui elevada salinidade e baixo teor de oxigênio dissolvido, por isso, faz-se necessária a análise do comportamento de alguns materiais em condições similares, com o intuito de avaliar o custo benefício da utilização de cada material. Um dos materiais utilizados nesse ambiente é o aço inoxidável supermartensítico, denominado Super 13 % Cr. Já foram realizados trabalhos que visavam avaliar a influência do acabamento superficial e do baixo teor de oxigênio na corrosão por pite deste aço. O presente trabalho tem por objetivo avaliar, de forma complementar, a influência do acabamento superficial em meio naturalmente aerado na corrosão por pite. A solução na qual o ensaio foi realizado possui concentração salina de 190g.L^{-1} NaCl, simulando as condições encontradas no pré-sal localizado em território brasileiro. Foram realizados ensaios eletroquímicos de polarização anódica potenciodinâmica e de morfologia dos pites por meio de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados encontrados evidenciam o potencial de pite de xx a yy, potencial de corrosão de xx a yy e a formação de camada passiva, sendo que, em acabamentos menos rugosos, o material se torna mais resistente à corrosão em conformidade com o esperado.

Palavras-chave: Aço inoxidável supermartensítico; Corrosão por pites; Acabamento superficial; Íon cloreto, Concentração de oxigênio.

ABSTRACT

The environment in which oil is extracted in the pre-salt has high salinity and low dissolved oxygen content, so it is necessary to analyze the behavior of some materials under similar conditions, in order to evaluate the cost benefit of the use of each material. Already studies have been carried out to evaluate the influence of surface finish and oxygen content on pite corrosion of 13% Cr supermartensitic stainless steel. The present work, in turn, has the objective of evaluating the susceptibility of the same material to corrosion by pite in aerated media, to analyze how the oxygen, together with the different surface finishes, can influence the susceptibility of the material to localized corrosion. The solution in which the test was performed had a high salt concentration, with the objective of simulating the conditions found in the Brazilian pre-salt ($190 \text{ g.L}^{-1} \text{ NaCl}$). Electrochemical potentiodynamic anodic polarization tests were carried out and sanding was used to prepare the samples in order to simulate different surface finishes. In addition, the scanning electron microscope (SEM) was used for the microstructural characterization of 13% Cr supermartensitic stainless steel. It could be inferred at the end of the work that, in less rough finishes, the material becomes more resistant to pitting corrosion.

Keywords: Supermartensitic stainless steel; Corrosion by pites; Surface finish; Chloride ion, Oxygen concentration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização do pré-sal.....	15
Figura 2 - Influência do teor de Cr na corrosão.....	16
Figura 3 - Efeito do teor de carbono sobre a corrosão de aço inoxidável tratado termicamente de modo a produzir a máxima precipitação de carbonetos.....	17
Figura 4 - Microestrutura da martensita.....	18
Figura 5 - Estrutura cristalina da martensita.....	19
Figura 6 - Ilustração do processo de corrosão por pite.....	22
Figura 7 - Esquema de uma célula eletroquímica utilizada para ensaios de polarização.....	23
Figura 8 - Curva esquemática de polarização para um metal que possui comportamento ativo passivo.....	24
Figura 9 - Local de retirada das amostras (em azul) e a região utilizada nos ensaios eletroquímicos (indicada pela seta).....	27
Figura 10 - Amostra lixada, soldada com fio de níquel encapado e embutida com resina epóxi.....	30
Figura 11 - Montagem da célula eletroquímica.....	30
Figura 12 - Imagem da estrutura martensítica após ataque metalográfico.....	31
Figura 13 - Difratoograma da amostra aço inoxidável.....	32
Figura 14 - Perfil bidimensional de amostra lixada com lixa de granulometria de 180.....	32
Figura 15 - Perfil tridimensional de amostra lixada com lixa de granulometria de 180.....	33
Figura 16 - Perfil bidimensional de amostra lixada com lixa de granulometria de 360.....	33
Figura 17 - Perfil tridimensional de amostra lixada com lixa de granulometria de 360.....	34
Figura 18 - Perfil de rugosidade bidimensional da amostra lixada com lixa de granulometria de 600.....	34
Figura 19 - Perfil de rugosidade da amostra lixada com lixa de granulometria de 600.....	35
Figura 20 - Curva de polarização anódica potenciodinâmica para amostra lixada com lixa de granulometria de 180.....	36
Figura 21 - Curvas de polarização anódica potenciodinâmica para amostra lixada com lixa de granulometria de 360.....	37
Figura 22 - Curvas de polarização anódica potenciodinâmica para amostra lixada com lixa de granulometria de 600.....	38

Figura 23 - Curvas de polarização obtidas para acabamentos obtidos com lixas de grão 180, 360 e 600.....	39
Figura 24 - Imagem de um pite, realizada por meio do MEV, em amostra cujo o acabamento foi realizado com lixa de granulometria de 180.....	41
Figura 25 - Imagem de um pite, realizada por meio do MEV, em amostra cujo o acabamento foi realizado com lixa de granulometria de 360.....	41
Figura 26 - Imagem de um pite, realizada por meio do MEV, em amostra cujo o acabamento foi realizado com lixa de granulometria de 600.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química nominal do material estudado.....	27
Tabela 2 - Valores extraídos das curvas obtidas por meio de ensaios realizados utilizando a lixa de granulometria de 180.....	36
Tabela 3 - Valores extraídos das curvas obtidas por meio de ensaios realizados utilizando a lixa de granulometria de 360.....	37
Tabela 4 - Valores extraídos das curvas obtidas por meio de ensaios realizados utilizando a lixa de granulometria de 600.....	38
Tabela 5 - Parâmetros obtidos através das curvas típicas de polarização para acabamento superficial com lixa de grão 180, 360 e 600 em meio contendo 10 ppb de O ₂ dissolvido em solução.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

i/cm^2 – Densidade de corrente

i_{pass} – Densidade de corrente de passivação

$\Delta|E_{\text{pass}}$ – Extensão da camada passiva

g – Grama

°C – Grau Celsius

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

OCP – Potencial de circuito aberto (Open Circuit Potential)

E_{cor} - Potencial de corrosão

pH – Potencial de hidrogênio

E_{pite} – Potencial de pites

E_{prot} – Potencial de repassivação

V – Volt

Dedico este trabalho primeiramente a Deus;

Aos meus amados pais;

As minhas irmãs Gabriela e Isabella;

Ao meu noivo Fred.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre ao meu lado durante minha caminhada, por me permitir superar os obstáculos que encontrei durante a vida.

Aos meus pais por terem me apoiado durante esse período, que, nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo superior, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Ao meu noivo, por sempre apoiar as minhas escolhas e por estar sempre por perto em momentos de necessidade.

Ao meu orientador Marcello Rosa Dumont e ao meu coorientador Mario José Bueno de Souza Freitas, por me ajudarem durante minha caminhada acadêmica, por me ensinar, orientar.

Ao CEFET-MG, ao todo seu corpo docente, técnicos e funcionário, que proporcionaram um ambiente propício para a expansão do conhecimento.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. Objetivo Geral.....	14
2.2. Objetivo Específico.....	14
3. REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	15
3.1. Aço Inoxidável.....	16
3.1.1. <i>Aço inoxidável mertensítico.....</i>	<i>18</i>
3.1.2. <i>Aço inoxidável supermartensítico 13%Cr.....</i>	<i>19</i>
3.2. Fundamentos da Corrosão.....	20
3.2.1. <i>Tipos de corrosão.....</i>	<i>20</i>
3.2.2. <i>Passivação.....</i>	<i>22</i>
3.3. Técnicas Eletroquímicas para corrosão.....	22
3.3.1. <i>Potencial de circuito aberto.....</i>	<i>23</i>
3.3.2. <i>Polarização anódica potenciodinâmica – avaliação de corrosão por pite.....</i>	<i>23</i>
3.4. Análise da Rugosidade.....	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1. Materiais.....	27
4.2. Metalografia.....	28
4.3. Difração de raio-X.....	28
4.4. Perfilometria.....	29
4.5. Polarização anódica potenciodinâmica.....	29
4.6. Análise morfológica.....	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
5.1. Preparação das Amostras.....	30
5.2. Caracterização Microestrutural.....	31
5.3. Difratomia de Raios-X.....	31

5.4.	Perfilometria 3D.....	32
5.5.	Ensaio Eletroquímico.....	35
6.	CONCLUSÃO.....	43
	REFERÊNCIAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

A descoberta do pré-sal foi estimulada pelo crescimento da produção de petróleo e gás, entretanto, para viabilizar a exploração desses insumos, foi e ainda é necessário o desenvolvimento de materiais resistentes ao fenômeno da corrosão, uma vez que no ambiente no qual ocorre a extração de petróleo e gás há elevado teor de íons Cl^- dissolvido, baixo teor de oxigênio. Exemplos de materiais que podem ser utilizados nessas condições críticas de corrosão são os aços duplex (elevado custo de produção) e os aços carbono (necessitam de inibidores de corrosão) (ANSELMO, 2006).

Com objetivo de substituir o aço duplex nessa aplicação, foi desenvolvido um aço inoxidável martensítico com 13 % de cromo (Cr), denominado Super 13 % Cr. Ele possui resistência mecânica, com valor de limite de escoamento de 600 MPa até 900 MPa, e alta resistência à corrosão devido à adição dos elementos cromo e níquel. A principal aplicação deste material é como duto na exploração de petróleo (ANSELMO, 2006; VALLOUREC & MANNESMANN TUBES, 2010).

Este trabalho visa analisar o comportamento do aço inoxidável supermartensítico frente à corrosão por pite em meios que simulam a agressividade do ambiente no qual o material será inserido. O meio utilizado para o ensaio foi o meio naturalmente aerado. Dessa forma, objetiva-se entender a influência do acabamento superficial em meio aerado no fenômeno da corrosão por pites. Essa diferença de acabamento pode ocorrer em função do método de fabricação do aço, seja ele, por exemplo, por meio do processo de usinagem, soldagem ou fundição. Para a avaliação do estudo, foram utilizadas técnicas de polarização anódica potenciodinâmica, análise de imagens por meio de microscopia eletrônica de varredura, e técnicas de caracterização como perfilometria e difração de raio-X.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo do trabalho é avaliar a susceptibilidade à corrosão por pites do aço inoxidável supermartensítico 13 % Cr com diferentes rugosidades superficiais em meio naturalmente aerado e de íons Cl⁻ dissolvido.

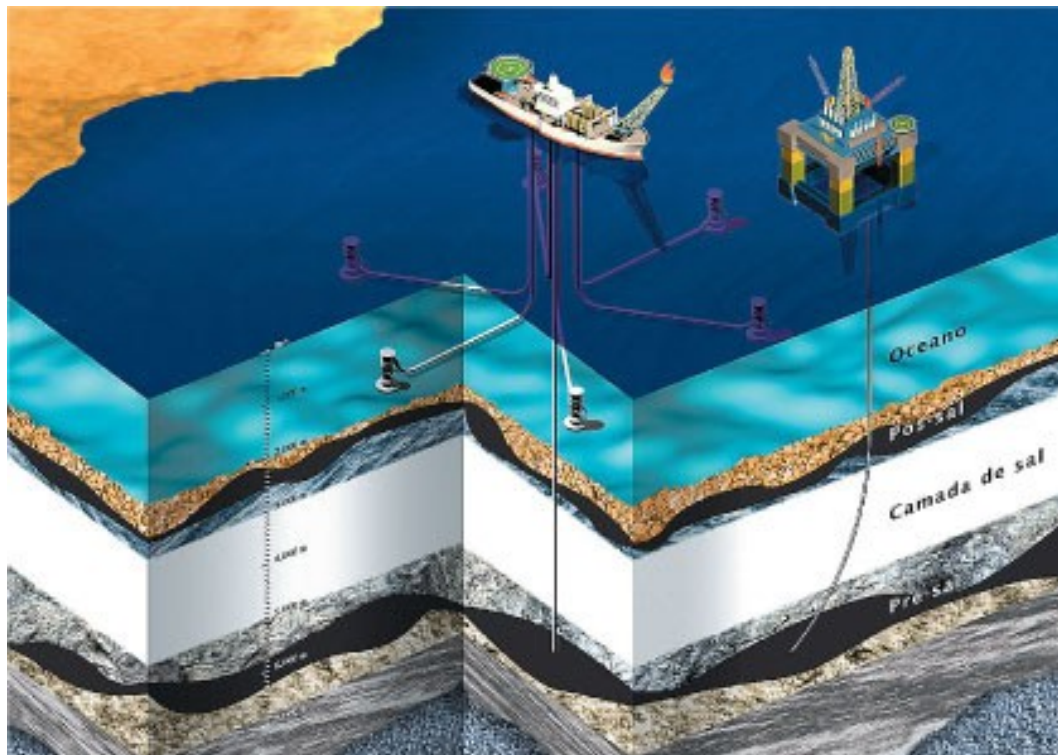
2.2. Objetivo Específico

- Caracterizar uma amostra do material Super 13 % Cr.
- Caracterizar a rugosidade gerada em cada tipo de lixamento.
- Avaliar o comportamento frente à corrosão por pite em diferentes acabamentos superficiais obtidos com diferentes lixas de carbetto de silício.
- Avaliar a morfologia dos pites formados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A descoberta do pré-sal na bacia sedimentar de Santos (RJ e SP) e no parque das Baleias (ES) transformou o setor de petróleo e gás no país. Esse petróleo se encontra à 7 mil metros de profundidade em relação ao nível do mar. Portanto, fez-se necessário o domínio de tecnologia capaz de auxiliar a extração desse insumo. Esses materiais são submetidos a meios extremamente corrosivos, principalmente devido à alta concentração de íons cloretos presentes na camada salina, que chega a 2 mil metros de espessura (Figura 1) (GOUVEIA, 2010).

Figura 1 - Localização do pré-sal



Fonte: GOUVEIA, 2010

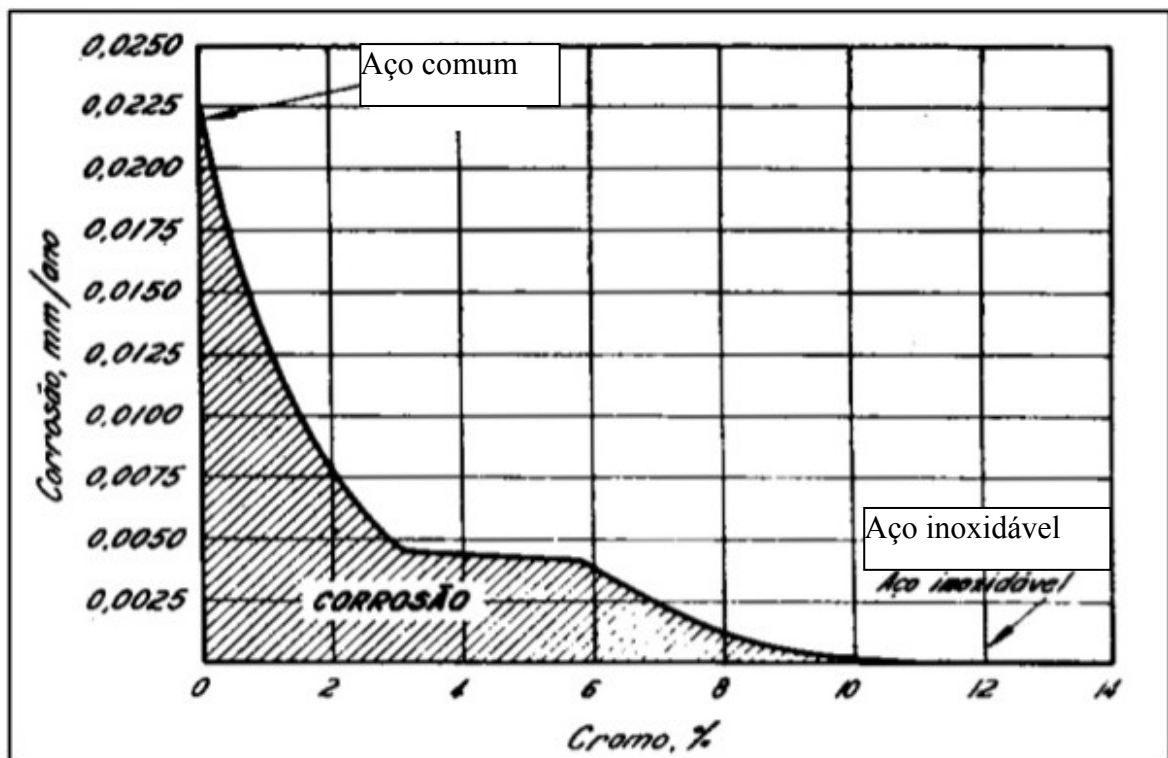
Nessa situação, tornou-se essencial o desenvolvimento de materiais com elevada resistência à corrosão em águas que possuíssem elevada concentração de Cl^- (cloreto), CO_2 (dióxido de carbono) e H_2S (ácido sulfídrico). Dessa maneira, foi desenvolvida uma nova classe de aços inoxidáveis com menor teor de carbono e elevada resistência à corrosão (aço inoxidável

supermartensítico), com o objetivo de substituir o aço inoxidável duplex. A resistência à corrosão deste aço deve-se a formação de um filme passivo protetor na superfície do metal (ANSELMO, 2006).

3.1. Aço Inoxidável

Aços inoxidáveis caracterizam-se pela alta resistência à corrosão em ambientes atmosféricos, águas naturais, solos ou produtos químicos. Eles adquirem passividade devido à presença de alguns elementos químicos em sua composição, como Cr, Si, Ni, Mo e Al. O cromo é o mais importante, visto que é bastante eficiente, desde que utilizado com teores acima de 10,5 %, como pode ser observado na Figura 2 (CHIAVERINI 1984)

Figura 2 - Influência do teor de Cr na corrosão

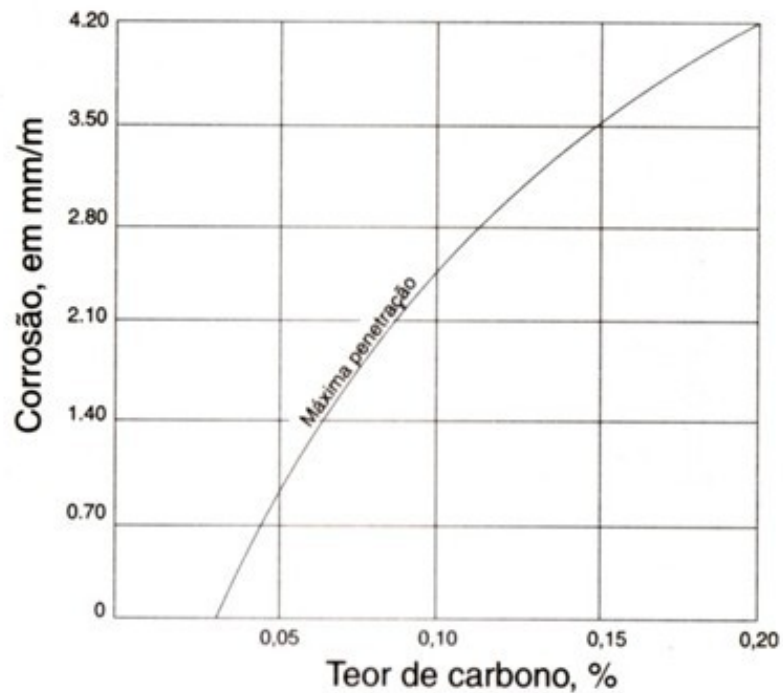


Fonte: adaptado de CHIAVERINI 1984

A resistência à corrosão ocorre devido à formação de uma película de óxido, principalmente de cromo (Cr_2O_3), que se forma na superfície do material e dificulta o ataque do meio corrosivo. Sabe-se também que a porcentagem de C deve ser limitada, uma vez que esse elemento se liga facilmente ao Cr, transformando em carbonetos e diminuindo, portanto, a

resistência à corrosão do aço inoxidável, como observado na Figura 3 (NÚCLEO INOX, 2004).

Figura 3 - Efeito do teor de carbono sobre a corrosão de aço inoxidável tratado termicamente de modo a produzir a máxima precipitação de carbonetos.



Fonte: NÚCLEO INOX, 2004

Os aços inoxidáveis se dividem em três grandes grupos de acordo com a microestrutura apresentada por eles (CHIAVERINI 1984):

- Ferrítico: possuem de 11 a 17 % de cromo e menos que 0,3 % de carbono. Não possui em sua composição níquel e seu custo quando comparado aos demais é menor. Eles possuem grande resistência à corrosão sob tensão, sua resistência pode ser aumentada por trabalho a frio e são de fácil conformação;
- Martensíticos: possuem de 12 % a 18 % de cromo, e de 1 % a 1,5 % de carbono. Podem receber tratamento de têmpera adquirindo elevados níveis de dureza e resistência mecânica.

- Austeníticos: possuem de 17 % a 25 % de cromo, e de 7 % a 20 % de níquel. Caracterizados pela alta ductilidade, melhor soldabilidade em comparação aos já mencionados, entretanto, se resfriado lentamente, entre 680 °C e 480 °C após a soldagem, poderá ocorrer uma precipitação de carbonetos de cromo nos espaços intergranulares da matriz cristalina provocando um decréscimo de sua resistência à corrosão e das propriedades mecânicas.

3.1.1. Aço inoxidável mertensítico

Na Figura 4, é apresentada a microestrutura da martensita. Os aços mertensíticos podem ser tratados termicamente obtendo a martensita como principal constituinte, para tal, são adicionados elementos de liga provocando mudanças no diagrama Fe-C (CALLISTER, 2002). Para sua produção, é necessário a realização da têmpera, resfriamento brusco em água ou óleo. Nesse processo ocorre a transformação de fase da austenita para a martensita. Essa transformação ocorre por meio de uma deformação plástica da estrutura do material, que promove o deslizamento dos planos atômicos com distorção da rede cristalina. A martensita gerada é frágil e sua dureza é de aproximadamente 60 HR_c. Sua estrutura cristalina é tetragonal de corpo centrado como mostrado na Figura 5 (CALLISTER, 2002).

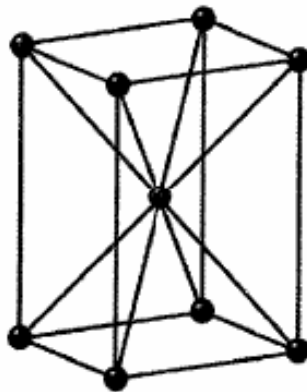
Para esse tipo de aço, faz-se necessária a aplicação de tratamento térmico de revenimento, a fim de ajustar a tenacidade. Nesse processo, ocorre uma queda na dureza devido à difusão dos átomos de carbono. Entretanto, as tensões são eliminadas, resultando em um ganho de tenacidade, podendo, dessa forma, evitar a formação de trincas e distorções (CALLISTER, 2002).

Figura 4 - Microestrutura da martensita



Fonte: CALLISTER, 2012, p. 327

Figura 5 - Estrutura cristalina da martensita



Fonte: CLARA e FERREIRA, 2007, p. 8

3.1.2. Aço inoxidável supermartensítico 13%Cr

Os aços inoxidáveis supermartensíticos 13 % Cr foram desenvolvidos para suprir as necessidades industriais que os aços martensíticos convencionais não preenchem. Há uma redução na concentração de carbono e isso faz com que estes aços possuam melhor

soldabilidade, maior tenacidade, ductilidade e resistência à corrosão generalizada e localizada, em relação aos aços martensíticos (RODRIGUES et. al. 2005; ANSELMO et al. 2006).

Eles são mais resistentes à corrosão que os aços martensíticos convencionais e menor que os aços duplex. Os tipos de corrosão mais comuns em aços supermartensíticos estão ligados à presença de CO₂ e H₂S no meio (DIAS, 2009).

Os aços inoxidáveis supermartensíticos 13 % Cr são compostos pelos seguintes elementos Fe-Cr-Ni-Mo e, quando comparado aos aços martensíticos, possuem menor concentração de carbono. Dessa forma, esse aço possui melhores propriedades relacionadas à soldabilidade, à tenacidade e à resistência à corrosão (RODRIGUES et. al.2005).

Os elementos que compõe a estrutura do aço supermartensítico 13 % Cr proporcionam diferentes efeitos em suas propriedades (KONDO et al., 2002; SILVA, 2010).

- Cr: este elemento está associado à resistência à corrosão a partir da formação do filme óxido que protege o material contra meios corrosivos. Entretanto, cabe ressaltar que, quando em excesso, estimula a formação de ferrita delta. Dessa forma, algumas propriedades como a tenacidade e a resistência mecânica ficam comprometidas;
- Ni: levando em consideração que os teores de carbono devem ser mantidos baixos, o níquel passa a ser o elemento responsável pela estabilização da austenita. Por intermédio desse elemento, a difusão do carbono é mais demorada, retardando o processo de precipitação de carbonetos, provocando aumento de tenacidade. Contudo, quando está em excesso, pode prejudicar a formação da martensita;
- Mo: é essencial para aumentar à resistência a corrosão do aço. Segundo Ilevbare e Burstein (2001) o molibdênio está presente nos filmes de óxido, portanto, a presença desse elemento diminui a formação de pites. Além disso, esses mesmos autores afirmaram que os pites formados tiveram mais dificuldade de crescimento na presença de molibdênio. Esse elemento proporciona também a estabilização da ferrita.

3.2. Fundamentos da Corrosão

Segundo Gentil (2013), a corrosão é a deterioração de materiais por ação química ou eletroquímica aliada ou não a esforços mecânicos. Em materiais metálicos a corrosão eletroquímica acontece na presença de eletrólito e envolve a formação de uma pilha eletroquímica com a circulação de elétrons na superfície. Já a corrosão química ocorre em ausência de água e há interação direta entre o metal e o meio corrosivo.

As reações presentes nesse processo são de oxirredução e a reação responsável pela corrosão do material é aquela em que há a passagem do metal da forma reduzida para a iônica, apresentada na Equação 1 (GENTIL, 2013).



Deve-se observar que, em presença de água ou umidade, o produto de corrosão pode ser apresentado na forma de hidróxido do metal corroído ou óxido hidratado do metal (NUNES; LOBO, 1998).

3.2.1. Tipos de corrosão

Corrosão generalizada

A corrosão conhecida como generalizada ou uniforme ocorre de forma homogênea em toda superfície. Dessa forma, observa-se uma perda uniforme de espessura, sendo, portanto, menos agressiva. É a forma mais comum de corrosão, sendo resultado da corrosão atmosférica em materiais metálicos, podendo ser prevista, estimada e levada em consideração com relativa facilidade durante a fase de projetos (CALLISTER 2002).

Corrosão localizada

A corrosão localizada ocorre em áreas específicas do material. Por esse motivo, é muito perigosa e deve ser monitorada a fim de evitar maiores danos. Exemplos de corrosões localizadas são: corrosão intergranular, por fresta, galvânica e por pite (PARDAL, 2012).

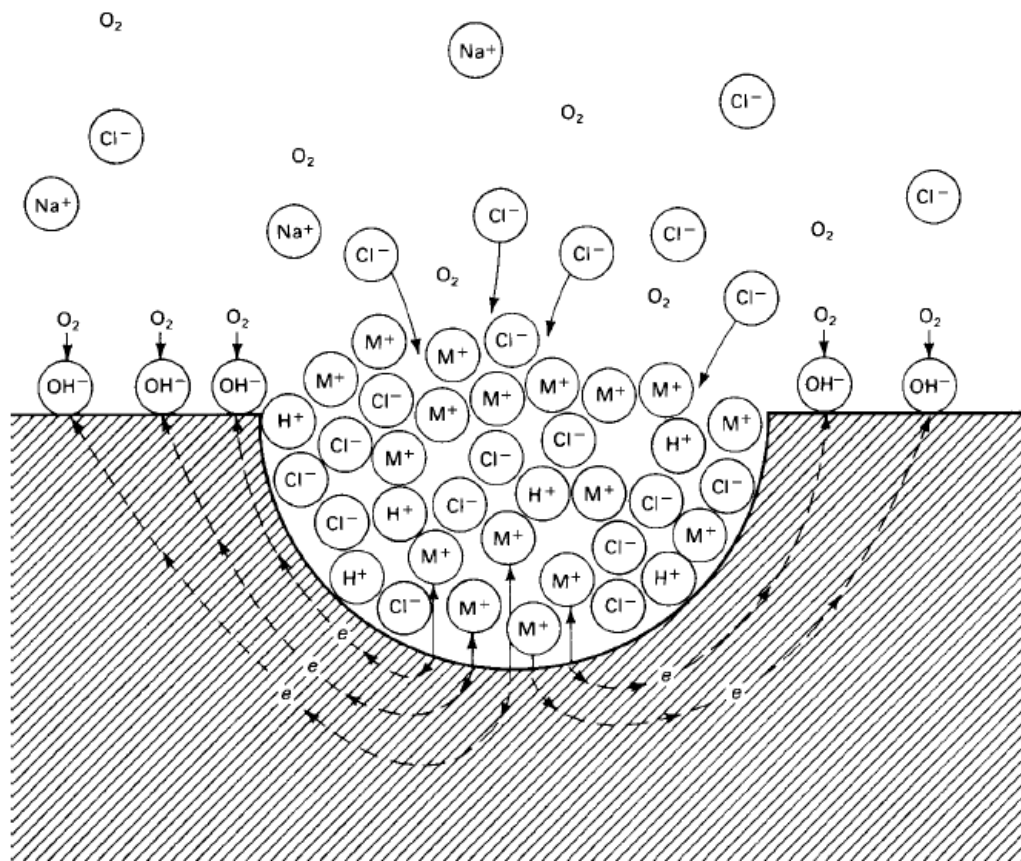
Corrosão por pite

Na corrosão por pite, ocorre a dissolução do metal em um determinado ponto que, dependendo da profundidade, pode levar o material a falha, principalmente quando o material é submetido a esforços de tensão, visto que, o local da corrosão torna-se um concentrador de tensão. O pite caracteriza-se por sua cavidade cujas dimensões são reduzidas. A perda de massa é pequena; sendo a corrosão difícil de ser detectada (LUCAN, 2011).

Em aços inoxidáveis em que ocorre a formação da camada passiva, a corrosão por pite promove a ruptura desse filme, formando uma pilha ativa-passiva. Isso acontece porque o cloreto é um ânion proveniente de um ácido forte e em muitos metais provoca danos na camada passiva. Além disso, a presença de oxigênio pode agravar a corrosão por pite. Dessa forma, o oxigênio deve ser removido por meio da desaeração, com o objetivo de atenuar a corrosão localizada (COUTINHO, 1992).

Durante o processo de corrosão por pite, o teor de oxigênio é menor na cavidade interna, enquanto no meio, esse elemento é mais abundante. Desse modo, forma-se uma pilha de aeração diferencial com região anódica localizada no interior do pite. Como resultado da corrosão, o teor de cátions do metal na cavidade do pite aumenta e por consequência, aumenta também a concentração de ânions, para manter a neutralidade. Deve-se observar que, na região anódica, ocorre um decréscimo do pH, devido à liberação de íons H^+ , já na região catódica, devido à redução de O_2 , há um aumento no pH. Cabe ressaltar, ainda, que esses ambientes com elevado teor de cloreto dificultam a repassivação do material, promovendo o crescimento do pite. Um resumo desse mecanismo é representado na Figura 6 (FRANKEL, 2003).

Figura 6 - Ilustração do processo de corrosão por pite.



Fonte: FRANKEL, 2003.

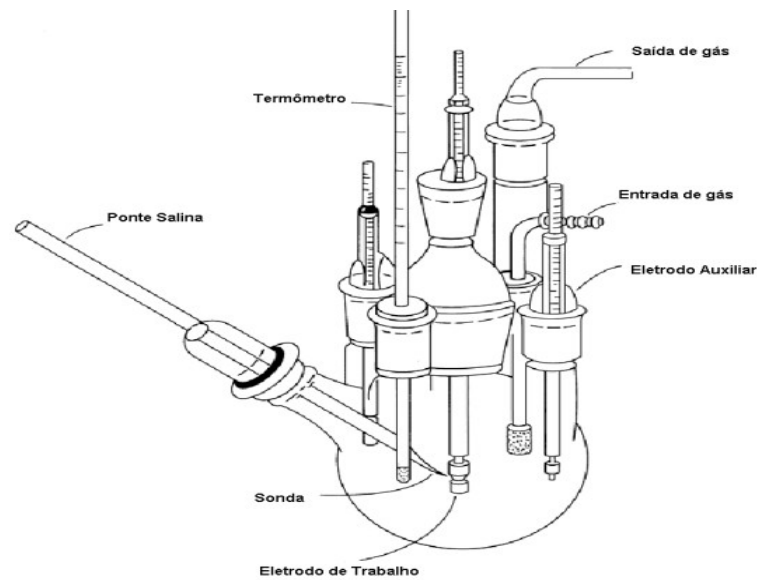
3.2.2. Passivação

Alguns materiais, quando submetidos a determinadas condições, permitem a formação de um filme óxido fino, protetor e aderente, tornam-se inertes. A camada formada serve como uma barreira contra a corrosão e a esse fenômeno dá-se o nome de passivação. Por esse motivo, muitos aços inoxidáveis são resistentes à corrosão em diversos ambientes. O elemento cromo, por exemplo, como elemento de liga em uma solução sólida no ferro, reage com o oxigênio presente na superfície e forma uma película de Cr_2O_3 . Essa película protetora, quando danificada, regenera-se rapidamente. Contudo, cabe ressaltar que, uma alteração no ambiente pode tornar a corrosão ativa novamente (CALLISTER, 2002).

3.3. Técnicas Eletroquímicas para corrosão

As técnicas eletroquímicas são essenciais para analisar a susceptibilidade do material à corrosão e, para tanto, faz-se necessária a utilização de uma célula eletroquímica, em que serão posicionados adequadamente o eletrodo de trabalho (material a ser utilizado) o eletrodo de referência (eletrodo que mantém um potencial constante em relação ao potencial aplicado pelo potenciostato), e o auxiliar (eletrodo que permite que flua uma corrente entre ele e o eletrodo de trabalho). Se necessário, pode-se também desaerar a solução e, nesse caso, deve-se utilizar gás inerte para diminuir a concentração interna de O_2 . A construção de um modelo de célula pode ser observada na Figura 7 (GENTIL, 2003; WOLYNEC, 2003).

Figura 7 - Esquema de uma célula eletroquímica utilizada para ensaios de polarização



Fonte: ASTM G5, 2011 – modificada

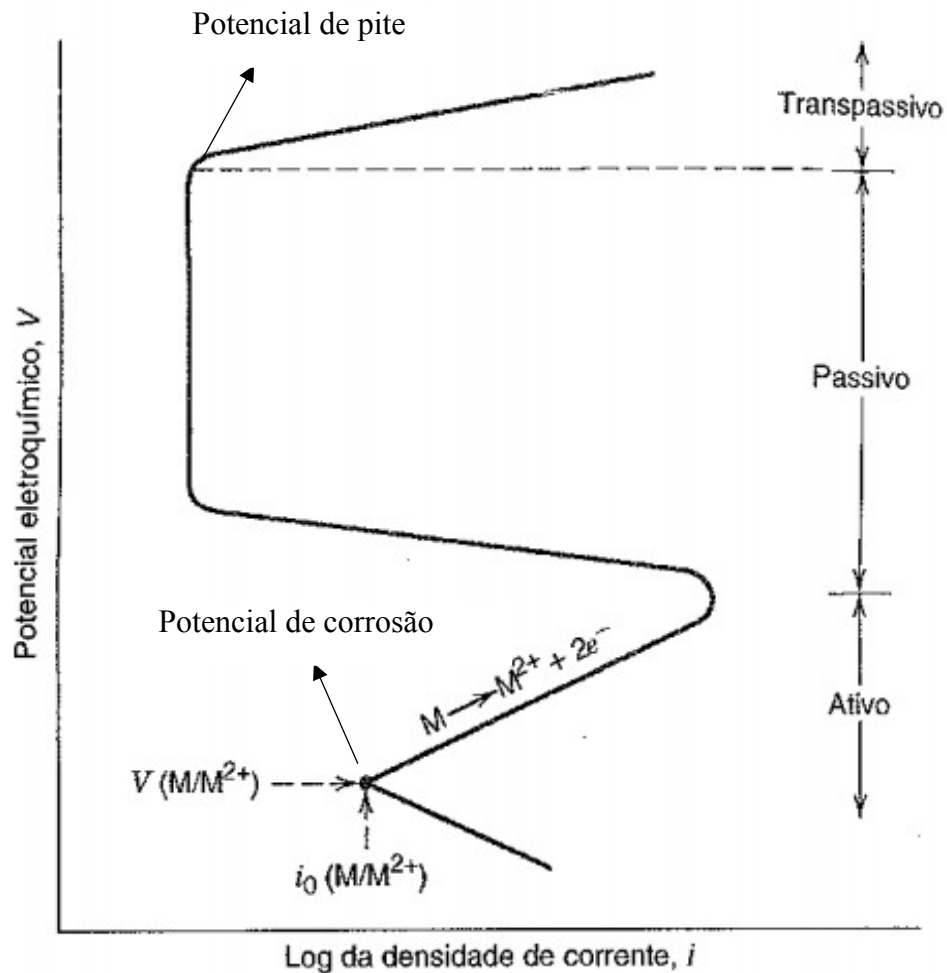
3.3.1. Potencial de circuito aberto

O potencial de corrosão é dado pela interseção da curva de polarização anódica com a de polarização catódica. Em diversas aplicações é conveniente acompanhar o valor de potencial de corrosão ao longo do tempo e, também, fazer o registro da variação do valor do potencial (WOLYNEC, 2003).

3.3.2. Polarização anódica potenciodinâmica – avaliação de corrosão por pite.

A polarização anódica potenciodinâmica permite a avaliação da corrosão por pite em aços capazes de formar camada passiva. Essa técnica é utilizada para a construção de uma curva de potencial por logaritmo da densidade de corrente. Nessa curva, inicialmente ocorre o início da corrosão generalizada e início de formação do filme. Nesta etapa, região ativa, a densidade de corrente se altera com a variação do potencial. Com o aumento do potencial, a densidade de corrente diminui até um valor mínimo e permanece nesse valor de corrente independente do potencial, configurando assim a região passiva. Ao atingir o potencial de pite (início da nucleação e crescimento dos pites) a densidade de corrente se altera bruscamente. A essa região dá-se o nome de transpassiva. Essas variações são observadas na curva demonstrada na Figura 8 (CALLISTER, 2002).

Figura 8 - Curva esquemática de polarização para um metal que possui comportamento ativo passivo



Fonte: adaptada CALLISTER 2002

A partir desse ensaio é possível determinar o potencial de pite (E_{pite}) e o potencial de corrosão (E_{corr}) e a extensão da camada passiva ($\Delta|E_{\text{pass}}$) e a densidade de corrente de passivação (i_{pass}). (SILVERMAN, 1998).

Descrição dos potenciais das figuras:

- Potencial de corrosão (E_{corr}): potencial no qual ocorre uma mudança de polarização catódica para anódica.
- Potencial de pite (E_{pite}): a partir desse potencial, os pites nucleiam e crescem. Esse potencial é determinado a partir da interseção entre o prolongamento do trecho de passivação e do trecho em que ocorre um aumento brusco da densidade de corrente.

Se, após o ensaio, não forem observados pites, esse ponto é conhecido como potencial de transpassivação.

- Densidade de corrente de passivação (i_{pass}): valor de densidade de corrente, no qual ocorre a passivação do material. Nessa região, ocorre um aumento no potencial sem variar a densidade de corrente de forma significativa.
- Extensão da camada passiva ($\Delta|E_{\text{pass}}$): esse valor é obtido por meio da subtração entre os valores obtidos de potencial de corrosão e do ponto inicial da região passiva.

3.4. Análise da Rugosidade

Nos projetos de engenharia, geralmente há contato entre as superfícies, caracterizando um par tribológico. Por esse motivo, torna-se extremamente importante avaliar a rugosidade da superfície dos materiais (SAITO; LOVADINO; KROLL, 2000; GADELMALA et al., 2002).

Os perfilômetros digitais são equipamentos que fornecem características topográficas das superfícies. Há dois sistemas de leitura: por contato ou sem contato. No primeiro método citado, uma ponta de diamante sintético é deslizada sobre a superfície e o seu deslocamento é convertido em um gráfico bidimensional. Um grande número de perfis paralelos medidos ao longo da área ou superfície selecionada, pode gerar uma imagem em 3 dimensões. Estes equipamentos fornecem parâmetros que identificam as características superficiais das amostras (SAITO; LOVADINO; KROLL, 2000; GADELMALA et al., 2002).

Para a análise bidimensional, os parâmetros de amplitude são os mais utilizados para medir características topográficas. Eles fornecem características verticais das irregularidades da superfície. Entre eles, pode-se citar o R_a , R_z e R_t . O parâmetro R_a é, geralmente, o mais utilizado nos controles de qualidade. Ele é definido como a média dos desvios absolutos das irregularidades da superfície (GADELMALA et al., 2002).

A análise tridimensional (3D) também possui sua parametrização específica. Esses parâmetros são mensurados dentro de uma área delimitada. Nesse caso, os valores das medições são estimados estatisticamente a partir de desvio-padrão ou variância. Assim, o parâmetro S_a é baseado na média do desvio-padrão entre picos e vales de uma superfície, da mesma forma que o R_a , entretanto ele leva em consideração o perfil tridimensional. Em uma análise 3D, os

picos e vales contidos na superfície podem ser representados por cores que representam as elevações (OLIVEIRA; PALMA; SALES, 2007).

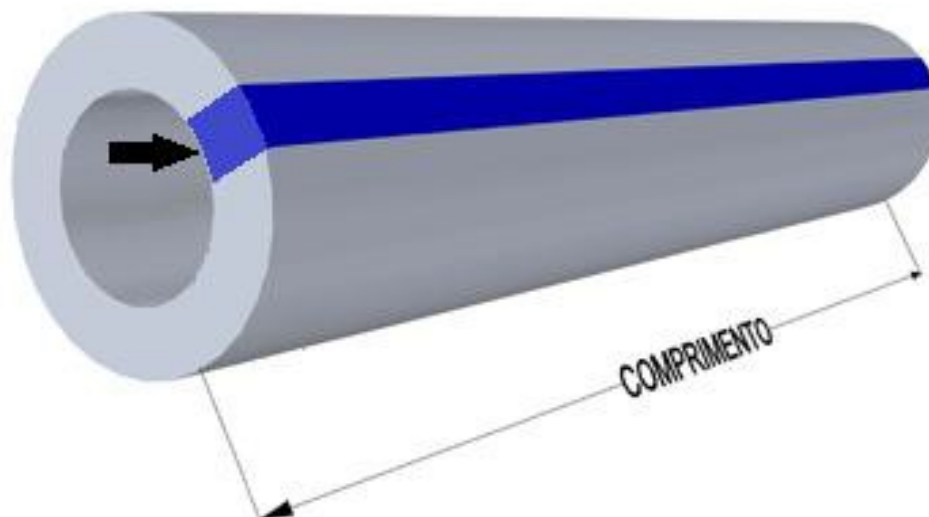
Quanto mais independentes são os dados de amostragem melhor é a avaliação. Assim, a análise estatística da superfície topográfica 3D é de maior estabilidade, mais confiável e representativa que a 2D, uma vez que o grande volume de dados obtidos aumenta sua independência (OLIVEIRA; PALMA; SALES, 2007).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Foi utilizado o aço com baixo teor de carbono supermartensítico com 13 % de cromo, produzido pela Vallourec & Mannesmann Tubes, denominado Super 13 % Cr. A composição química típica do material está descrita na Tabela 1. O material foi analisado sem nenhum tipo de beneficiamento prévio. As amostras possuem dimensões de 10 mm x 10 mm x 10 mm (Figura 11) e são provenientes de um tubo de dimensões de 244,00 mm de diâmetro externo e de 13,84 mm de espessura, conforme demonstrado na Figura 9. Os ensaios foram realizados na superfície interna da amostra.

Figura 9 - Local de retirada das amostras (em azul) e a região utilizada nos ensaios eletroquímicos (indicada pela seta)



Fonte: FREITAS, 2015

Tabela 1 - Composição química nominal do material estudado.

Elemento (%)									
C	Cr	Ni	Mo	Ti	Si	Mn	P	S	Fe
<0,03	11,50	5,50	1,50	0,15	0,10	0,30	<0,025	0,010	Bal.

Fonte: FREITAS, 2015

A solução utilizada para a realização dos ensaios eletroquímico foi obtida na concentração de 190 g.L^{-1} de cloreto de sódio P.A Synth e $0,66 \text{ g.L}^{-1}$ de acetato de sódio tri-hidratado P.A Synth. O oxigênio dissolvido na solução não foi removido e nem controlado, representando uma solução aerada naturalmente. O p da solução foi ajustado com ácido acético glacial 99,8 % P.A Neon até atingir $\text{pH} = 4$, a fim de se simularem as condições do pré-sal.

Preparação das amostras

As amostras foram inicialmente lixadas com lixa de carbetto de silício da marca Norton de grão 600 para remover arestas e rebarbas e suas dimensões foram aferidas com o auxílio de um paquímetro. Posteriormente, na superfície oposta de cada amostra, foi soldado com solda a ponto um fio de níquel-cromo, encapsado, com o intuito de estabelecer contato elétrico. Por

último, as amostras foram embutidas a frio com resina epóxi Redelease em moldes de silicone de 30 mm de diâmetro.

Posteriormente as amostras foram lixadas com lixa de carbetto de silício de grão 180, 360 e 600, gerando as diferentes rugosidades e foram lavadas com álcool etílico 95 % P.A e secas com um jato de ar quente.

4.2. Metalografia

As amostras foram lixadas até a lixa de granulação de 600 e polidas com pasta de diamante até 3 μm . Posteriormente, foram atacadas quimicamente em solução Vilella (5ml HCl + 2gr Ácido Pícrico + 100ml Álcool Etilico) à temperatura ambiente e o tempo de ataque foi de 20 segundos. Depois do ataque, as amostras foram fotografadas no microscópio óptico da marca Kontrol e modelo IM713.

4.3. Difração de raio-X

Foi utilizado o difratômetro da marca SHIMADZU modelo XDR - 7000. Os parâmetros utilizados foram os seguintes: radiação Cu-K α , $\lambda =$ de 1,54 Å, passo de 0,02°, faixa de varredura de 10° a 70°, corrente de 30 mA e voltagem de 40 Kv.

4.4. Perfilometria

Foi realizado ensaio de perfilometria 3D em perfilômetro Hommelwerke modelo T8000 modo contato com a ponteira de raio de 5 μm e ângulo de 90°. A área analisada no ensaio equivale a 6 mm².

4.5. Polarização anódica potenciodinâmica

Foi utilizado método de polarização anódica potenciodinâmica com o auxílio do potenciostato/galvanostato Vertex IVIUM acoplado a um notebook com o software IVIUM para controle do ensaio e aquisição de dados.

A montagem da célula eletroquímica foi realizada utilizando-se: eletrodo de referências de Ag/AgCl (saturado com solução de 3 mol.l⁻¹ de KCl), eletrodo auxiliar de platina (Pt) e eletrodo de trabalho (amostra).

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em triplicata, à temperatura de 24 °C ± 3 °C. Após o posicionamento de todos os eletrodos, transferiu-se a solução para a célula eletroquímica. Antes de iniciar-se o ensaio, a amostra permaneceu na solução por 1 hora para medir o valor do OCP (Potencial de Circuito Aberto), tempo necessário para a amostra entrar em equilíbrio com a solução, ou seja, quando não ocorre uma grande variação no potencial.

A taxa de varredura utilizada foi de 0,5 mV.s⁻¹, partindo do potencial de circuito aberto. O ensaio foi finalizado quando a densidade de corrente atingiu o valor de 10⁻³ A.cm⁻².

4.6. Análise morfológica

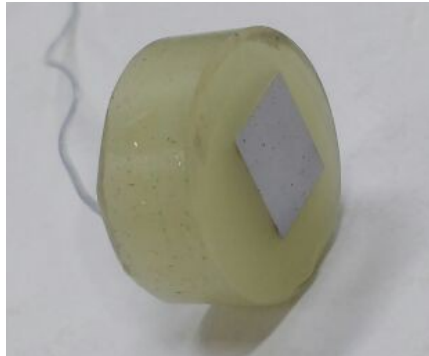
Após a realização dos ensaios eletroquímicos a morfologia da superfície corroída foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura em equipamento SHIMADZU SSX – 550. A superfície das amostras foi metalizada com ouro no equipamento Sanyu Electron Quick Coater modelo SC - 701 MkII. As imagens foram obtidas com detector de elétrons secundários, com energia de 15 KV.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Preparação das Amostras

O resultado final da preparação da amostra, após etapa de soldagem do fio de níquel-cromo, embutimento e lixamento, é mostrado na Figura 10.

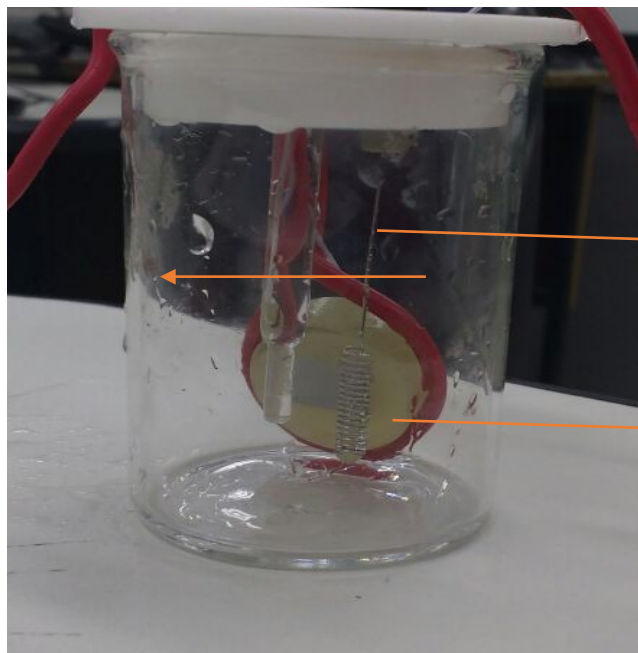
Figura 10 - Amostra lixada, soldada com fio de níquel encapado e embutida com resina epóxi



Fonte: próprio autor

Para posicionar corretamente a amostra dentro da célula eletroquímica, foi utilizado um fio de cobre revestido. Os eletrodos de platina e de referência foram posicionados nos seus respectivos suportes da própria célula. A montagem pode ser observada na Figura 11.

Figura 11 - Montagem da célula eletroquímica



Eletrodo de referência

Eletrodo de platina

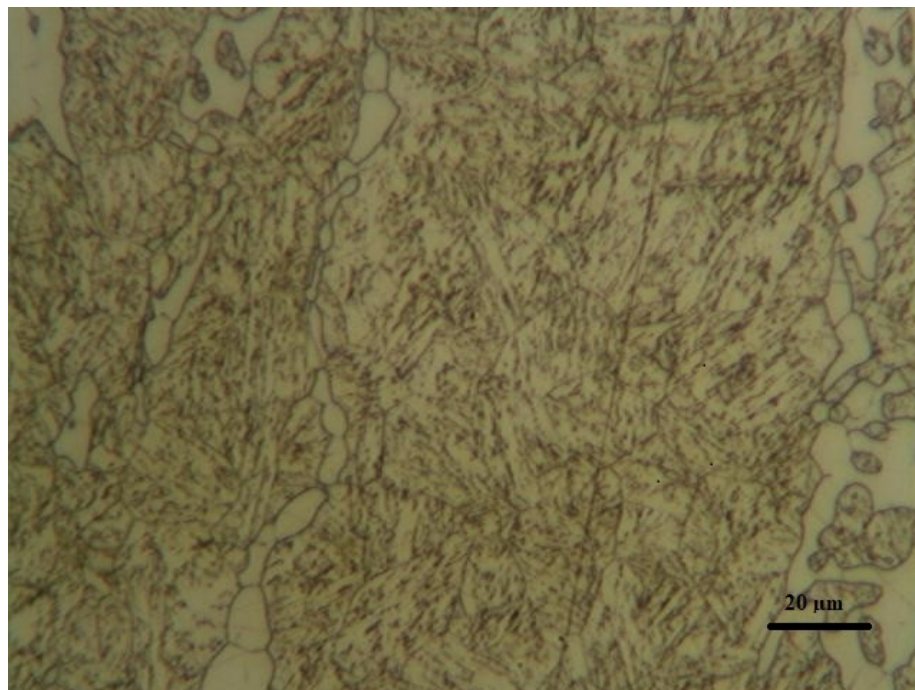
Eletrodo de trabalho

Fonte: próprio autor

5.2. Caracterização Microestrutural

O material foi submetido ao ataque metalográfico para observar a sua estrutura. Por meio das imagens, pode-se constatar, conforme consta no Callister 2002, que é composta predominantemente por martensita, típico de aço inoxidável martensítico.

Figura 12 - Imagem da estrutura martensitica após ataque metalográfico



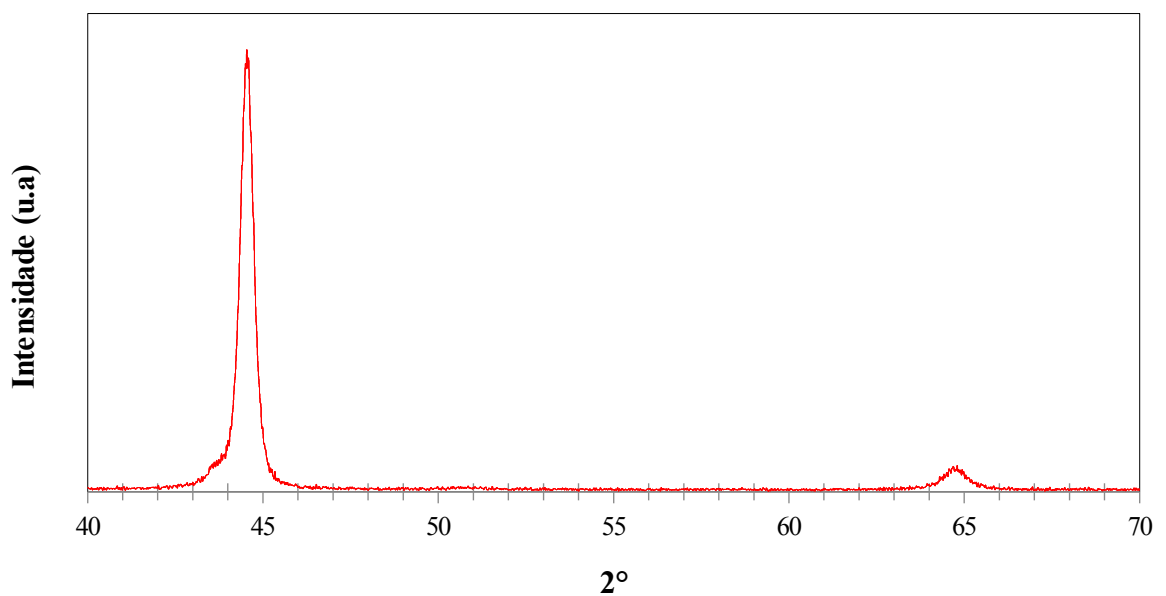
Fonte: próprio autor

5.3. Difratometria de Raios-X

O difratograma obtido é mostrado na Figura 13. São observadas, na faixa angular analisada (2θ de 30° a 70°), duas reflexões, sendo a mais intensa em 2θ igual a aproximadamente $44,5^\circ$ e a segundo bem menos intenso em 2θ igual a aproximadamente $64,8^\circ$. Para as fases predominantemente previstas, as reflexões são de 2θ igual a $44,6^\circ$ e $65,0^\circ$ para a martensita [plano (110) e (200)] e de 2θ igual a $43,5^\circ$ para a austenita [plano (111)], ICDD 00-033-0397 e ICDD 00-006-0696 respectivamente.

Os resultados apresentados sugerem uma sobreposição das reflexões da γ -Fe austenita e da α' -Fe martensita gerando um sinal com alargamento na base do lado esquerdo. Ao se realizar a tempera, certa quantidade de austenina não se transforma em martensita, originando assim, a austenita retida, que é uma fase metaestável (SILVA, 2010).

**Figura 13 - Difratoograma da amostra aço inoxidável
supermartensítico 13% Cr**

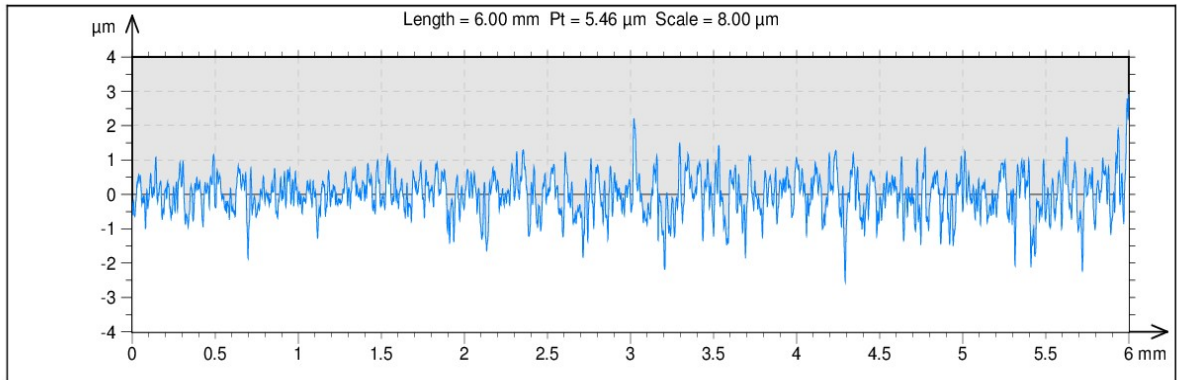


Fonte: próprio autor

5.4. Perfilometria 3D

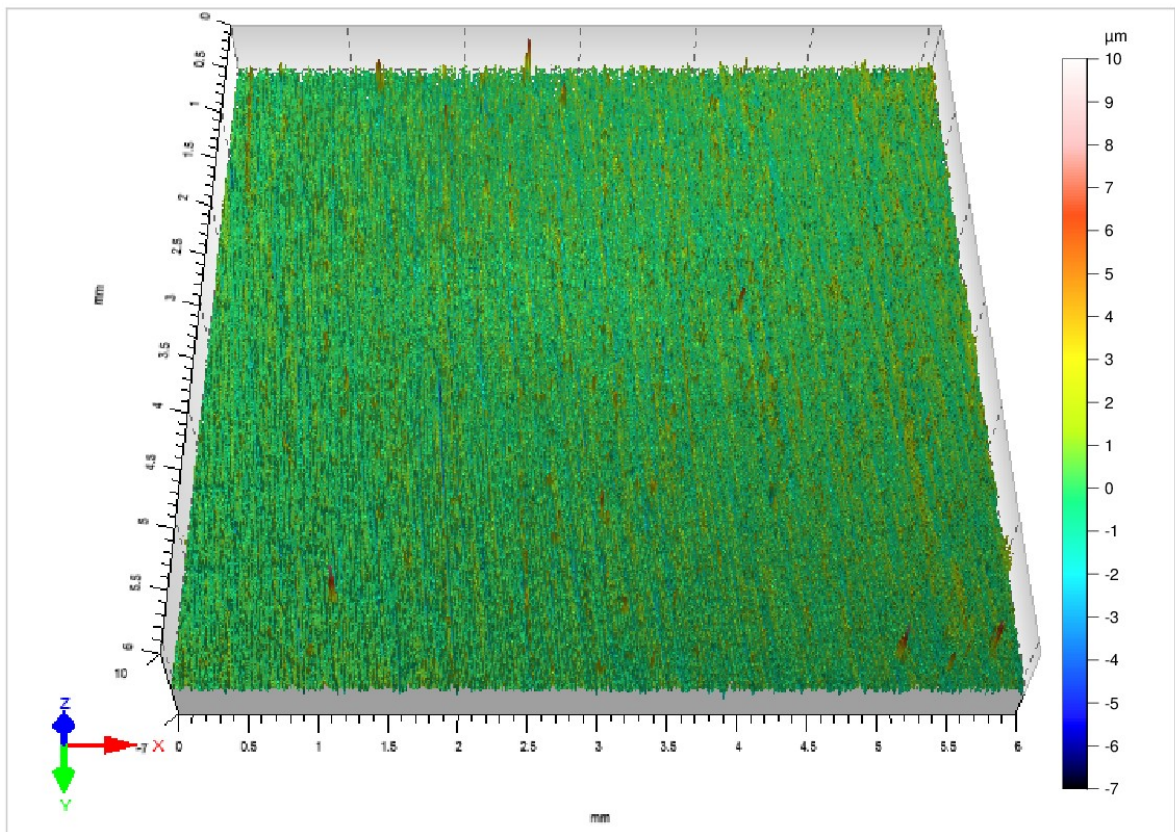
O perfil bidimensional para a amostra com lixa de grão 180 é mostrado na Figura 14. A reconstrução da superfície em 3 dimensões é mostrada na Figura 15. O S_a obtido foi de 0,456 μm .

Figura 14 - Perfil bidimensional de amostra lixada com lixa de granulometria de 180



Fonte: próprio autor

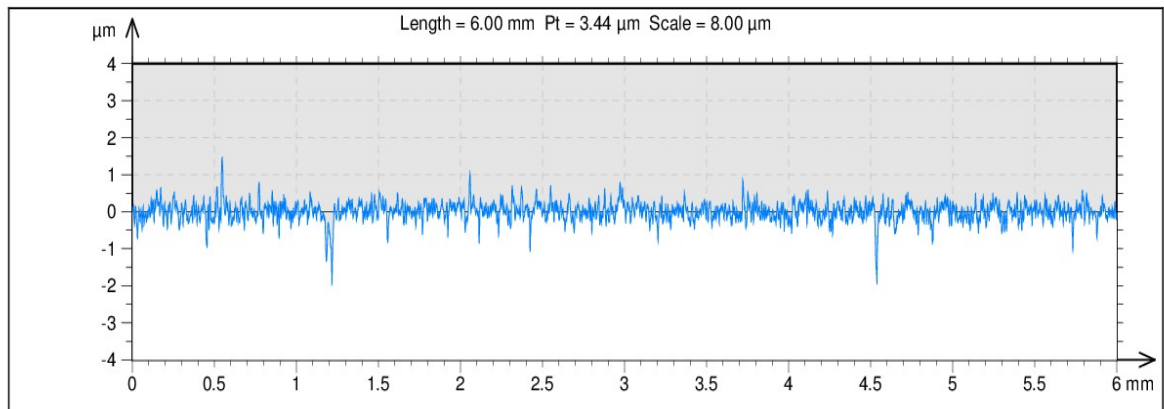
Figura 15 - Perfil tridimensional de amostra lixada com lixa de granulometria de 180



Fonte: próprio autor

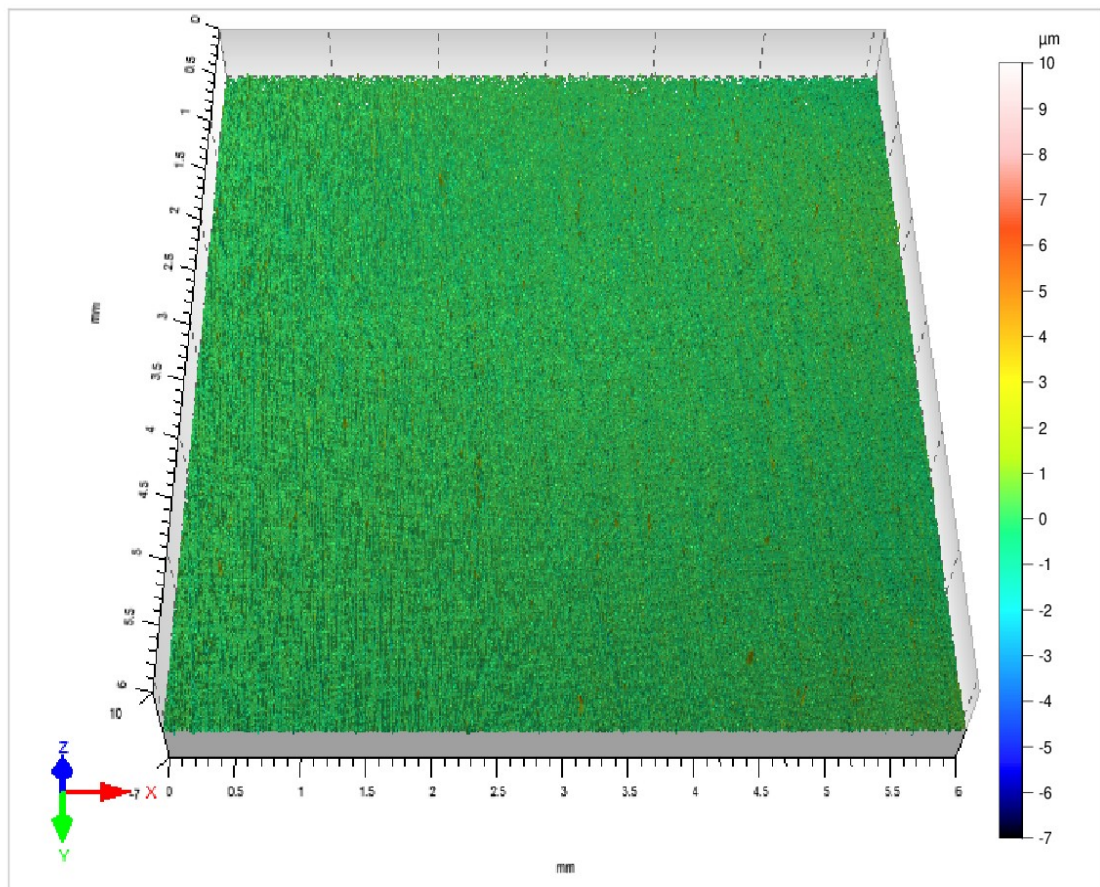
O perfil bidimensional para a amostra com lixa de grão 360 é mostrado na Figura 16. A reconstrução da superfície em 3 dimensões é mostrada na Figura 17. O S_a obtido foi de 0,190 μm .

Figura 16 - Perfil bidimensional de amostra lixada com lixa de granulometria de 360



Fonte: próprio autor

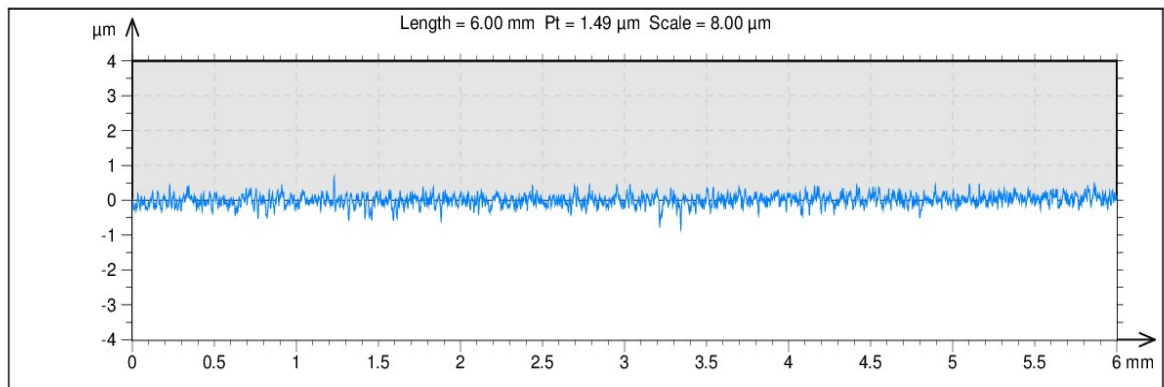
Figura 17 - Perfil tridimensional de amostra lixada com lixa de granulometria de 360



Fonte: próprio autor

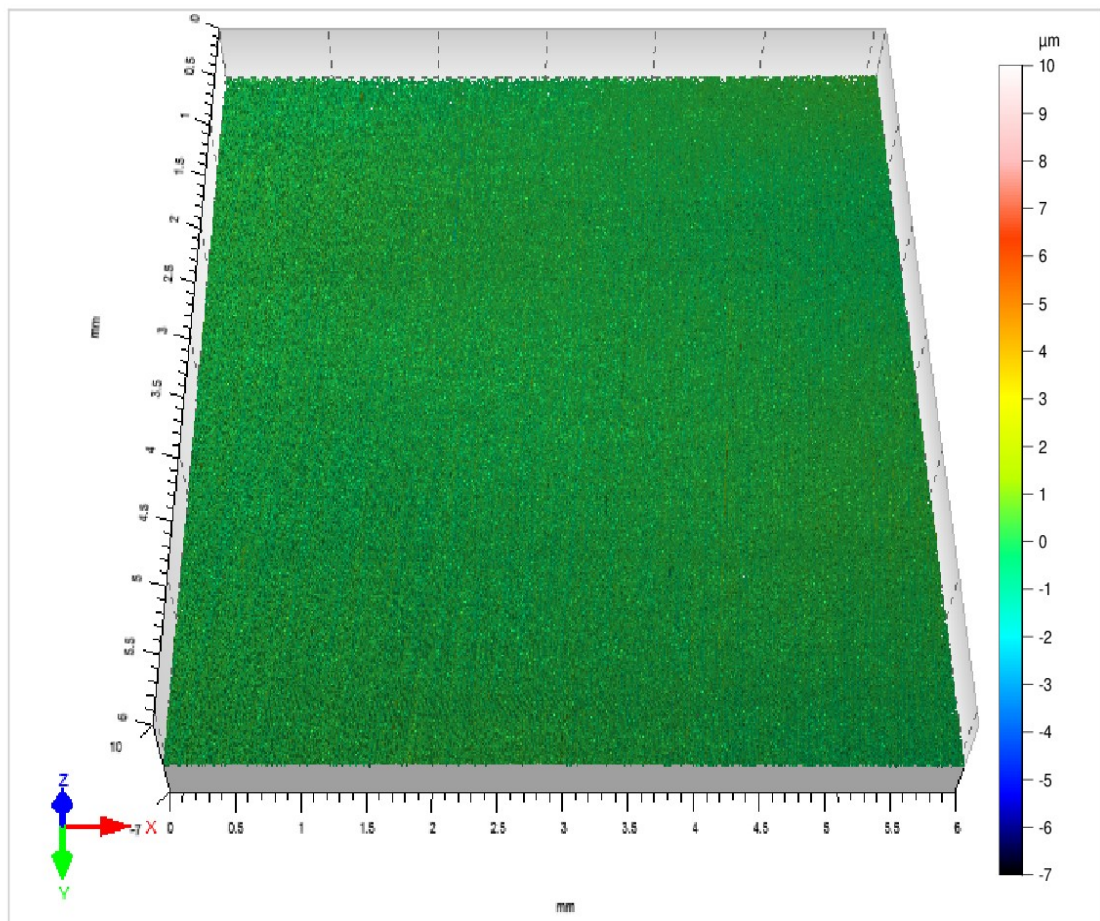
O perfil bidimensional para a amostra com lixa de grão 600 é mostrado na Figura 18. A reconstrução da superfície em 3 dimensões é mostrada na Figura 19. O S_a obtido foi de 0,146 μm .

Figura 18 - Perfil de rugosidade bidimensional da amostra lixada com lixa de granulometria de 600.



Fonte: próprio autor

Figura 19 - Perfil de rugosidade da amostra lixada com lixa de granulometria de 600



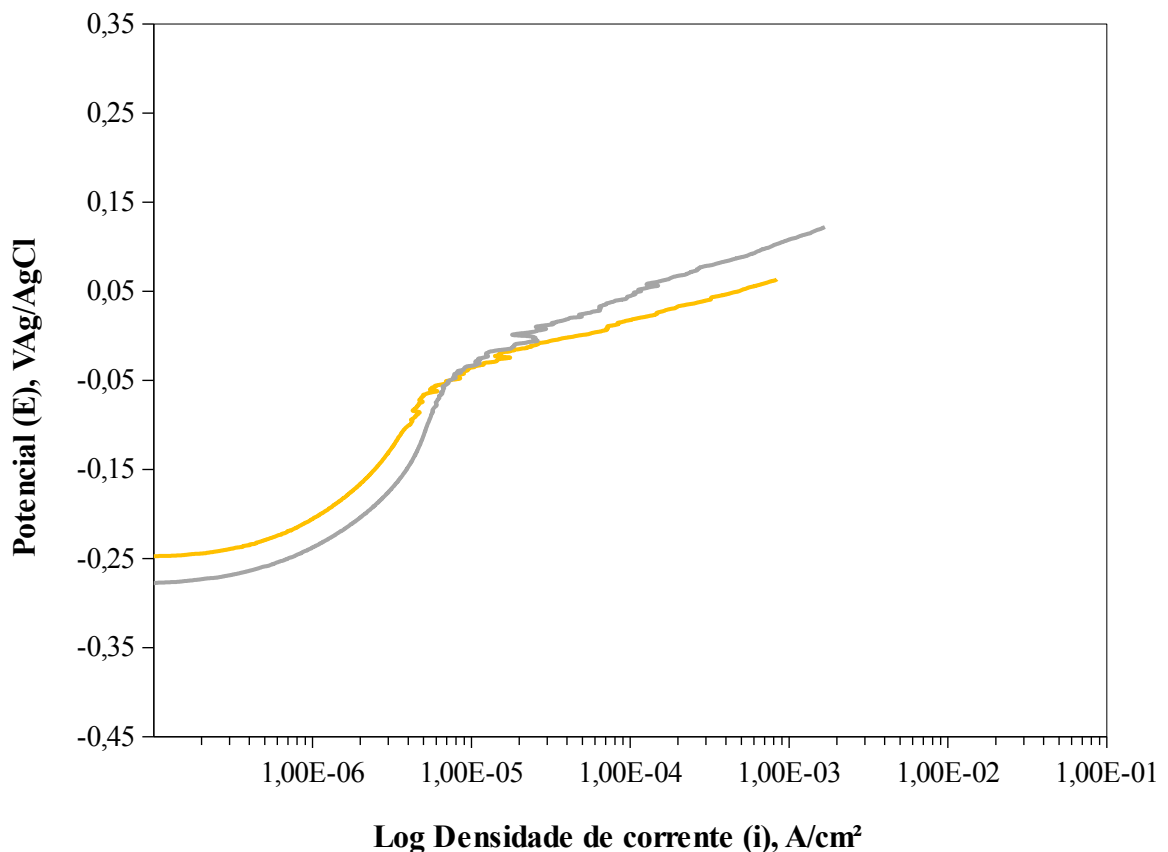
Fonte: próprio autor

Pode concluir que os valores de rugosidade média (S_a) decrescem de acordo com o aumento do número da lixa utilizada para o acabamento superficial final, sendo, portanto, o S_a obtido por meio de ensaio de perfilometria realizado na amostra lixada com lixa de granulometria de 600 o de menor valor.

5.5. Ensaio Eletroquímicos

Os resultados obtidos para amostra obtidas por meio de lixa de grão 180, 360 e 600 são mostrados na Figura 20, na Figura 21 e na Figura 22. Na Tabela 2, na Tabela 3 e na Tabela 4, estão indicados os parâmetros extraídos de cada curva.

Figura 20 - Curva de polarização anódica potenciodinâmica para amostra lixada com lixa de granulometria de 180.



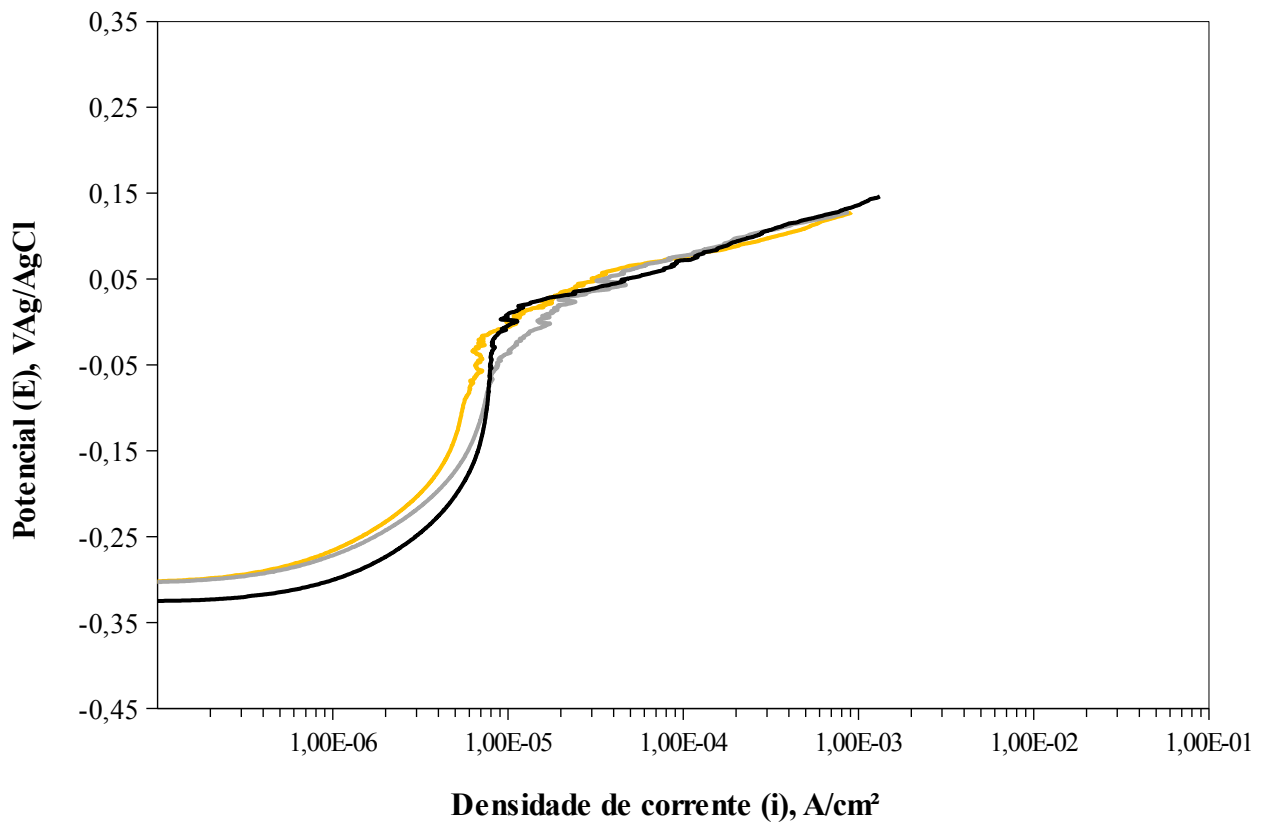
Fonte: próprio autor

Tabela 2 - Valores extraídos das curvas obtidas por meio de ensaios realizados utilizando a lixa de granulometria de 180

Nº Ensaio	E_{corr} (mVAg/AgCl)	 Δ E_{pass} (mV)	E_{pite} (mVAg/AgCl)	i_{pass} (μA.cm⁻²)
1	-255,0	90,0	-33,7	5,3
2	-277,0	86,0	-30,0	4,4
3	-247,0	93,0	-39,7	3,9
Média	-259,7	89,7	-34,5	4,5
Desvio padrão	13,0	2,9	2,3	0,6

Fonte: próprio autor

Figura 21 - Curvas de polarização anódica potenciodinâmica para amostra lixada com lixa de granulometria de 360.



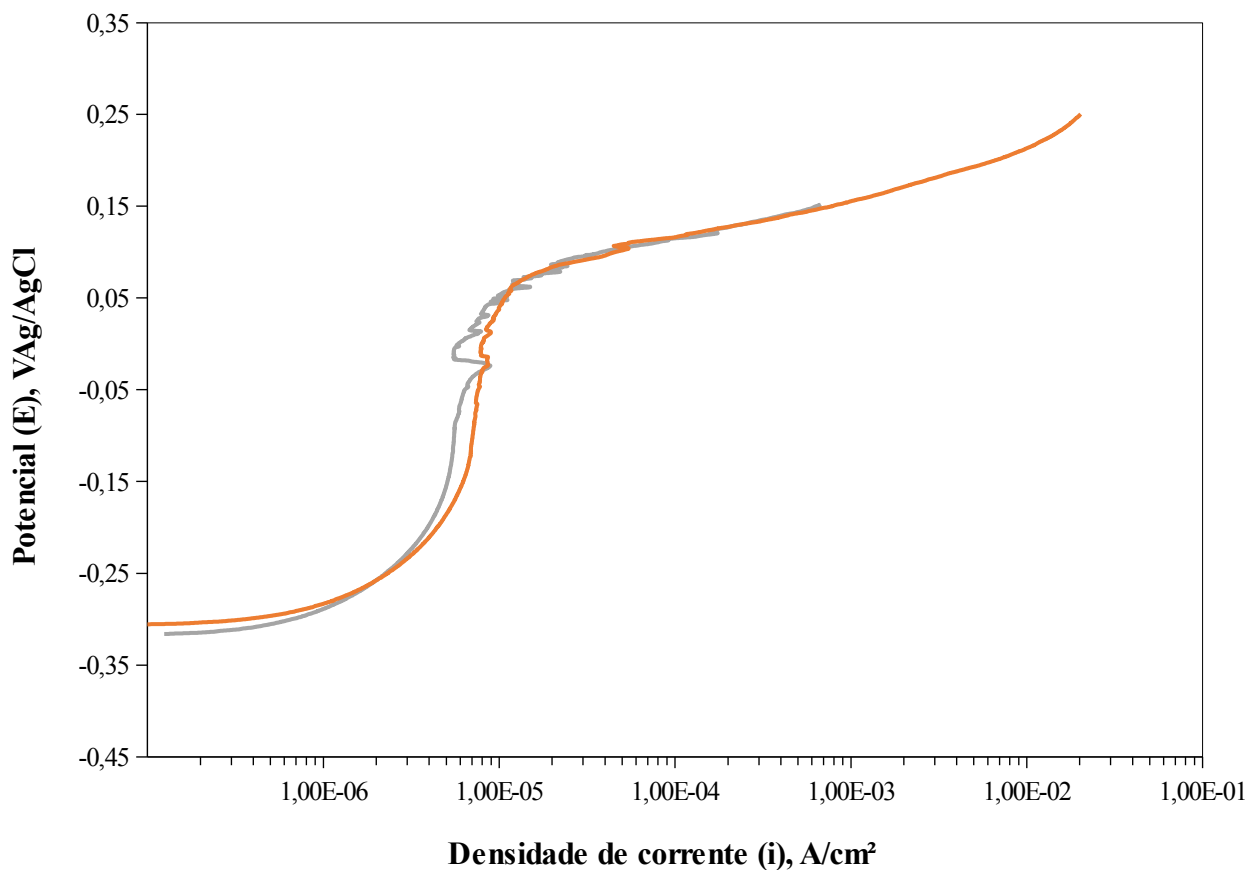
Fonte: próprio autor

Tabela 3 - Valores extraídos das curvas obtidas por meio de ensaios realizados utilizando a lixa de granulometria de 360

Nº Ensaio	E_{corr} (mVAg/AgCl)	$ \Delta E_{\text{pass}} $ (mV)	E_p (mVAg/AgCl)	i_{pass} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
1	-324,0	200,0	5,7	7,3
2	-301,0	210,0	8,9	7,6
3	-301,0	230,0	8,7	5,5
Média	-308,7	213,3	7,7	6,8
Desvio padrão	10,8	12,5	0,7	0,9

Fonte: próprio autor

Figura 22 - Curvas de polarização anódica potenciodinâmica para amostra lixada com lixa de granulometria de 600.



Fonte: próprio autor

Tabela 4 - Valores extraídos das curvas obtidas por meio de ensaios realizados utilizando a lixa de granulometria de 600

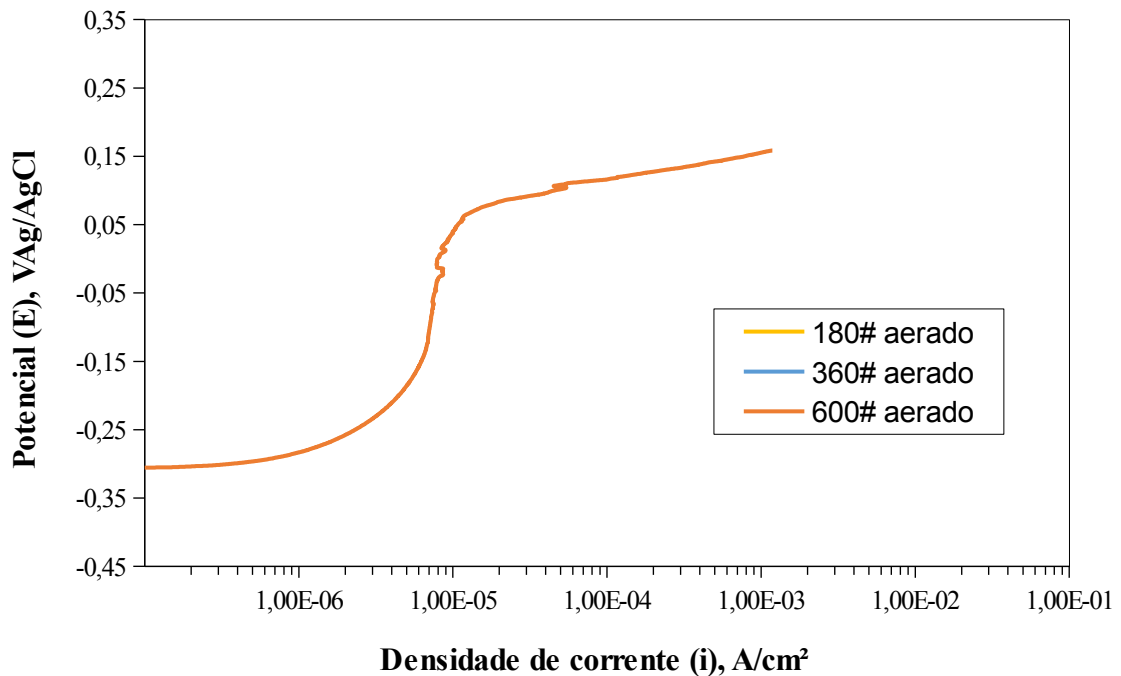
/N° Ensaio	E_{corr} (Mv)Ag/AgCl	ΔE_{pass} (mV)	E_p (mVAg/AgCl)	i_{pass} ($\mu A \cdot cm^{-2}$)
1	-297,0	310,0	87,0	5,7
2	-305,0	280,0	61,0	5,8
3	-316,0	300,0	53,0	6,3
Média	-306,0	296,7	67,0	5,9

Desvio padrão	7,8	12,5	14,5	0,3
---------------	-----	------	------	-----

Fonte: próprio autor

A análise comparativa entre os três acabamentos superficiais realizados é mostrada na Figura 23.

Figura 23 - Curvas de polarização obtidas para acabamentos obtidos com lixas de grão 180, 360 e 600



Fonte: próprio autor

Os dados apresentados confirmam que o acabamento superficial interfere na susceptibilidade do material à corrosão por pite. Foi observado que, com a diminuição da rugosidade de 0,456 μm para 0,146 μm , o material se comporta de forma mais nobre, ou seja, ocorre uma melhora no comportamento do material frente à corrosão localizada. Essa melhora é evidenciada, pelo aumento do valor de E_p de -34,5 mV para 67,0 mV e pelo aumento da extensão região passiva. Na curva referente ao acabamento realizado com lixa de grão 180, observa-se que, na região passiva, a curva se torna menos íngreme e, por isso, essa região não é bem definida. Já na curva obtida com acabamento realizado com a lixa de grão 600, a região

passiva é bem definida e, nessa região, é possível perceber uma elevada inclinação. Essa observação está de acordo com o trabalho de Freitas (2015). Portanto, o acabamento superficial realizado com a lixa de grão 600 se mostrou menos susceptível a corrosão por pite. Esse comportamento encontra-se de acordo com os resultados encontrados por Freitas (2015), no qual é demonstrado o comportamento em soluções desareadas.

Ao se comparar os resultados obtidos com os encontrados por Freitas, 2015 (Tabela 5) pode se perceber que o oxigênio dissolvido também influencia no comportamento do material frente à corrosão por pites. Nos ensaios realizados por Borges (2015) em solução contendo 10 ppb do oxigênio dissolvido, o potencial de pite é de -37 mV, enquanto comparado aos ensaios naturalmente aerados, houve um aumento para 67 mV (valor médio). Um aumento também pode ser observado ao se comparar os resultados de Borges com os obtidos nesse trabalho em amostras obtidas por meio de lixamento com lixas se grão 360 e 600. Dessa forma, a presença de elevado teor de oxigênio dissolvido, torna o material menos susceptível a corrosão. Isso ocorre porque em baixo teor de oxigênio, a camada passiva formada não é aderente, compacta e protetora.

Tabela 5 - Parâmetros obtidos através das curvas típicas de polarização para acabamento superficial com lixa de grão 180, 360 e 600 em meio contendo 10 ppb de O₂ dissolvido em solução.

Lixa utilizada	E _{corr} (mV)	Δ E _{pass} (mV)	E _p (mV)	i _{pass} (μA.cm ⁻²)
180	-415	115	-187	8,94
360	-413	148	-165	7,80
600	-422	263	-68	7,52

Fonte: Freitas, 2015 (modificado)

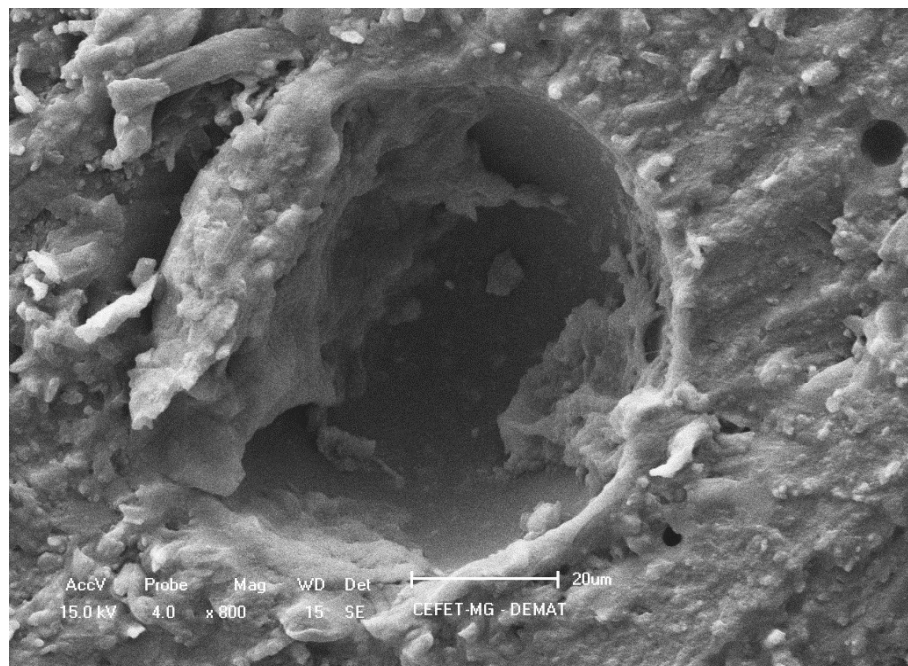
Percebe-se que, por um lado, o oxigênio se torna necessário para que o filme passivo, composto por Cr₂O₃, seja formado, visto que a camada passiva é resultado da interação do oxigênio com o elemento metálico presente na amostra; por outro lado, sua presença influencia diretamente na corrosão, pois ele é catalisador da reação de ionização do metal. Portanto, sua baixa concentração dificulta a formação da camada passiva e dificulta também o

processo de corrosão, enquanto a sua abundância promove a formação de um filme aderente e compacto e facilita o processo de corrosão (BORGES, 2015).

As imagens obtidas por MEV das áreas corroídas são mostradas na Figura 24, na Figura 25 e na Figura 26.

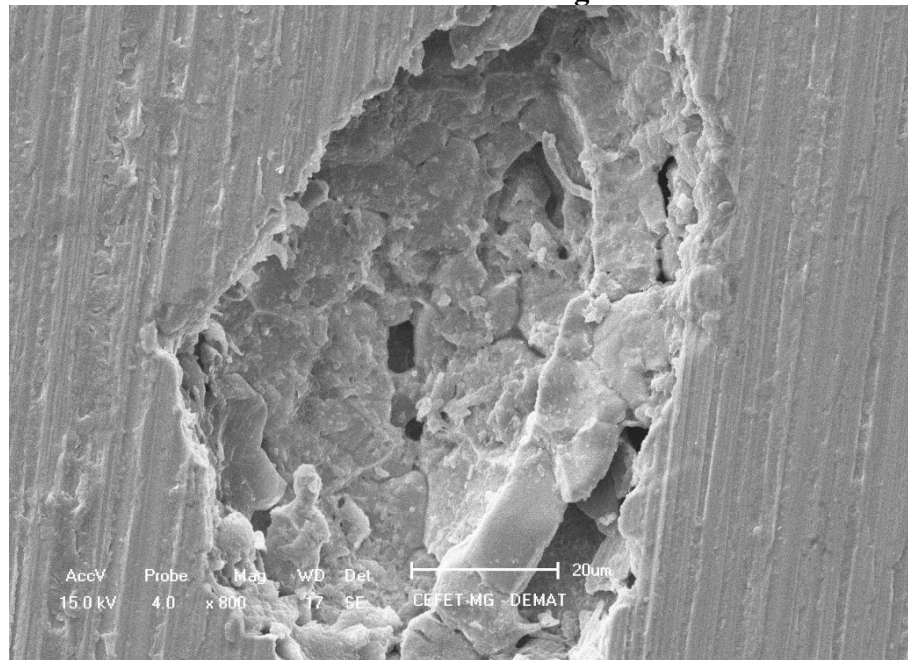
Essas imagens são característica de pite, pois são compostos por pequenas cavidades em que há a profundidade, imagens semelhantes podem ser observadas no trabalho de Lopes (2016), Mansur (2015) e Freitas (2015). Os pites são afastados entre si e grande parte da superfície se encontra ainda passivada, ou seja, nessa região não ocorreu a ruptura localizada do filme passivo. Observa-se a presença de pites menores, nesse caso, o ensaio foi interrompido antes de ocorrer o crescimento desses pites. Esse resultado está de acordo com trabalhos publicados anteriormente. (LOPES, 2016)

Figura 24 - Imagem de um pite, realizada por meio do MEV, em amostra cujo o acabamento foi realizado com lixa de granulometria de 180



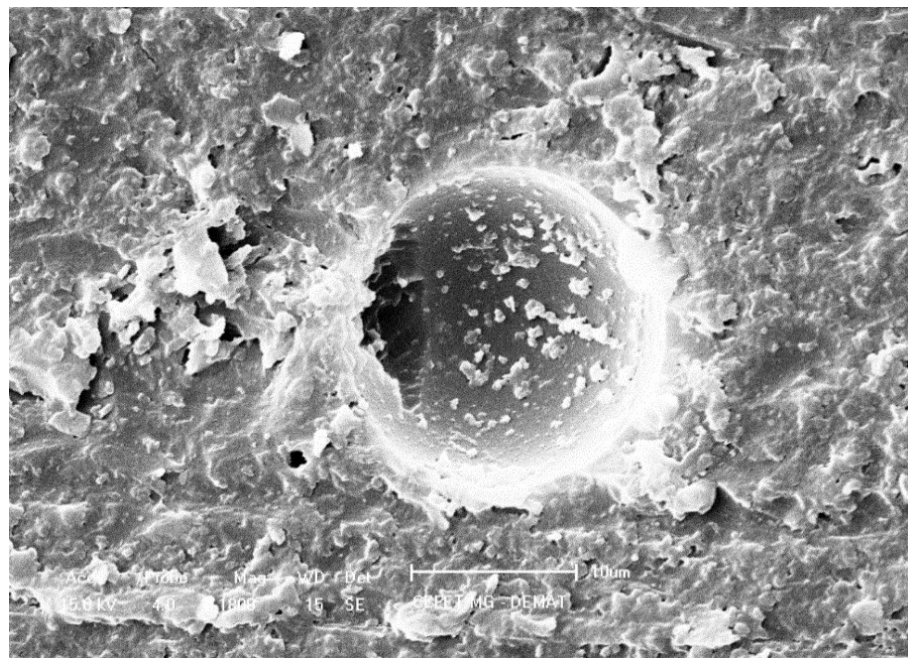
Fonte: próprio autor

Figura 25 - Imagem de um pite, realizada por meio do MEV, em amostra cujo o acabamento foi realizado com lixa de granulometria de 360



Fonte: próprio autor

Figura 26 - Imagem de um pite, realizada por meio do MEV, em amostra cujo o acabamento foi realizado com lixa de granulometria de 600



Fonte: próprio autor

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre o comportamento frente à corrosão por pite do aço inoxidável supermartensítico em ambiente com elevado teor de íons Cl^- e meio naturalmente aerado. Deste estudo as seguintes considerações podem ser realizadas:

Por meio da análise da microestrutura e de difração de raio-X, verifica-se que a estrutura do material é predominantemente a martensita e que há a presença de uma pequena quantidade de austenita, conforme o esperado.

Com os resultados da análise de perfilometria, observou-se que os valores de rugosidade média (S_a) decrescem de acordo com o aumento da granulometria da lixa utilizada para o acabamento final. Assim, o S_a obtido por meio da lixa de grão 600 é melhor que o obtido com a lixa de grão 180.

Por meio dos ensaios eletroquímicos, verificou-se que o acabamento superficial-influencia o comportamento do material frente a corrosão por pite. Dessa forma, nos ensaios em que as amostras foram preparadas com a lixa de grão 600, o comportamento do material em relação a corrosão por pite foi melhor que o preparado com a lixa de grão 180.

Em relação a influência do teor de oxigênio dissolvido, por meio da comparação com trabalhos anteriores, foi possível perceber a presença do oxigênio torna o material menos susceptível a corrosão por pites.

REFERÊNCIAS

ALVES, V.A., CAVALEIRO, A. & COIMBRA, U. De, 2001. Influence of heat treatment on the corrosion of high speed steel. *Journal of applied electrochemistry*, pp.65–72. Disponível em: <http://www1.ci.uc.pt/pessoal/chrisbrett/docs/52_JAE.pdf> Acesso em 10 jun. 2017

ANSELMO, N. et al., 2006. Corrosion behavior of supermartensitic stainless steel in aerated ind co2-saturated synthetic seawater. *Materials science and engineering: A*, 428(1-2), pp.73–79. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509306005314>> Acesso em 13 jun. 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AÇO INOXIDÁVEL - ABINOX. Camada passiva – a responsável pela notável resistência à corrosão do aço inoxidável. 2004. Disponível em: <<http://www.nucleinox.com.br/upfiles/arquivos/biblioteca/a-camada-passiva.pdf>> Acessado em 10 maio 2017

APERAM. Aços inoxidáveis: aplicações e especificações. 2008. Disponível em: <http://www.nucleinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/Acesita_Aplica_Especificacao_Aperam.pdf> Acesso em 21 jun. 2017.

CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5ed. São Paulo, 2002.

CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos*. 5a Ed. São Paulo. ABM, 1984.

CLARA, M. S.; FERREIRA, C. Curso de inspetor de soldagem nível 1 metalurgia / controle de deformação e metais de base (Apostila V). 2007. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/82642059/Apostila-5-Metalurgia>> Acesso em 22 jun. 2017

COUTINHO, C. A. B.. Materiais metálicos para engenharia. Belo Horizonte, Fundação christiano Ottoni, 1992. 405p.

CULLITY, B. D. , Elements of X-ray diffraction. Addison-Wesley Publishing Company Inc. 1956. Cap 3 -5.

DIAS, G. P. Avaliação da tenacidade à fratura de um aço inoxidável supermartensítico submetido à proteção catódica em água do mar. 2009. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DONG, W.P., SULLIVAN, P.J. and STOUT, K.J., Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography IV:Parameters for characterising spatial and hybrid properties, *Wear*, 178, p.45- 60,1994.

FRANKEL, G.S. Pitting corrosion. *ASM Handbook*, Vol. 13A: Corrosion: fundamentals, testing, and protection, ASM International, p. 236–241, 2003.

FREITAS, M. J. B. S. Avaliação da susceptibilidade à corrosão localizada do aço inoxidável supermartensítico com diferentes acabamentos superficiais. 2015. Dissertação (Mestrado), Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

GADELMALA, E. S. et al. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam*, v. 123, n. 1, p. 133-145, abr. 2002.

GENTIL, V. Corrosão. 4a ed. LTC, 2003. 360p.

GOUVEIA, F., 2010. Tecnologia nacional para extrair petróleo e gás do pré-sal. *Conhecimento & inovação*, 6, pp.30–35. Disponível em: http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S198443952010000100010&nrm=iso> Acesso em 16 abr. 2017

ILEVBARE, G. O.; BURSTEIN, G. T. The role of alloyed molybdenum in the inhibition of pitting corrosion in stainless steels. *Corrosion Science*, v. 43, n. 3, p. 485-513, 2001.

KONDO, K. et al. Development of weldable super 13Cr martensitic stainless steel for flowline. In: The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. 2002 International Society of Offshore and Polar Engineers.

LOPES, D. R. Avaliação da corrosão por pites de aço inoxidável supermartensítico em meio contendo íons cloreto e tiosulfato. 2016. Dissertação (Mestrado), Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear.

LUCAN, D. Degradations of Incoloy 800 Steam Generator Tubing., Pitesti, Romania, Institute for Nuclear Research 2011.

MANSUR, F. A. Corrosão da liga 800gn em ambiente do circuito secundário da central nuclear de angra 2. 2015. Dissertação (Mestrado), Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear.

NÚCLEO INOX. Coletânea de informações técnicas – Aço inoxidável. 2004. Disponível em: <http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/A%E7o%20Inoxid%E1vel_No%E7%F5es%20b%E1sicas.pdf> Acesso em 10 maio 2017.

NUFFIELD, E. W. – X-ray diffraction methods –John Wiley & Sons, Inc. 1966 cap. 5.

NUNES, L. P. Fundamentos de resistência à corrosão. Interciência, 1998.

OLIVEIRA, C. J.; PALMA, E. S.; SALES, W. F. Sensibilidade na análise de forma em função da quantidade de harmônicas por revolução. In: COBEF CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4, 2007, Estância de São Pedro. *Anais eletrônicos*.

PARDAL, JUAN MANOEL. Aços inoxidáveis super duplex: efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas, magnéticas e resistência à corrosão. São Paulo, 2012. 341p.

RODRIGUES, C. A. D., DI LORENZO, P.L., SOKOLOWSKI, A., BARBOSA, C. A., ROLLO, J. M. A. Curvas TTT de Três aços inoxidáveis supermartensíticos microligados ao Be, Nb e Ti. In: CONGRESSO ANUAL INTERNACIONAL DA ABM, 60. 2005 p. 3148 - 3156. CD-ROM.

SAITO, S. K.; LOVADINO, J. R.; KROLL, L. B. Rugosidade e pigmentação superficial de materiais ionoméricos. Pesquisa Odontológica Brasileira, São Paulo, v. 14, n. 4, p. 351-356, out./dez. 2000.

SILVA, R.R., 2010. Avaliação da zona termicamente afetada de um aço inoxidável supermartensítico. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Disponível em: <http://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1395M.PDF>.

SILVERMAN, D., 1998. Tutorial on cyclic potentiodynamic polarization technique. CORROSION 98, (299). Disponível em :<https://www.onepetro.org/conference-paper/NACE-98299> > Acesso em 25 set. 2017

WOLYNEC, S., 2003. Técnicas eletroquímicas em corrosão Vol. 49, São Paulo: EdUSP.