



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

DAVI ALVES MARQUES

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA
CORROSÃO DE LIGAS METÁLICAS**

FORTALEZA

2018

DAVI ALVES MARQUES

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA
CORROSÃO DE LIGAS METÁLICAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Metalúrgica da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

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

A478a Alves Marques, Davi.
Avaliação da influência da rugosidade superficial na corrosão de ligas metálicas / Davi Alves Marques. - 2018.
44 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.

1. Rugosidade Superficial. 2. Corrosão. 3. Metais. I. Título.

CDD 669

DAVI ALVES MARQUES

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA
CORROSÃO DE LIGAS METÁLICAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Metalúrgica e Materiais da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Msc. Daniel de Castro Girão
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

À Deus, que iluminou meu caminho, me deu forças para persistir sempre e nunca desisti de mostrar o que é correto.

Aos meus pais, Sandra e Claudio, por sempre mostrarem apoio nas minhas decisões e por todas as oportunidades que me proporcionaram.

À minha irmã, Joyce, por ser um exemplo de dedicação e esforço.

À Luana por estar ao meu lado nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Walney da Silva Araújo, pela orientação e paciência.

Aos membros da banca examinadora, Daniel e Jorge, pela disponibilidade.

Aos meus amigos de curso, em especial Diego Salmin, Emmanuel, Joshua, Pedro Guilherme e Roberto, pelos momentos vividos durante o curso.

Aos meus amigos de colégio, em especial Claudio Henrique, pelo apoio, críticas e palavras de motivação.

Aos amigos do LPC, em especial Marister, Matheus, Otilio, Vinícius, e Úrsula por me ajudarem na realização do trabalho e pelos momentos de descontração.

“Be kind, for everyone you meet is fighting a battle you know nothing about.”

Autor desconhecido

RESUMO

A corrosão é um grande problema que impacta diretamente na aplicação de materiais metálicos, principalmente em ambientes costeiros que apresentam altas concentrações de íons Cl^- dispersos na atmosfera. A corrosão é um fenômeno eletroquímico influenciado diretamente pela área de contato entre o material metálico e a atmosfera corrosiva. Esse estudo propõe avaliar o impacto da rugosidade superficial, visto que a mesma, embora invisível à olho nu, pode representar um aumento significativo na área de contato acelerando assim os processos corrosivos. Para isso, foram utilizadas três ligas metálicas distintas: ASTM A36, ASTM A743 grau CA6NM e ASTM A890 grau 6A imersas em um eletrólito 0,1M de NaCl. A rugosidade superficial foi criada através da preparação superficial utilizando lixas d'água de granulometrias 400#, 600# e 1200#, a fim de manter uma regularidade da rugosidade ao longo dos ensaios. Os ensaios realizados consistem em uma estabilização do potencial de circuito aberto (OCP) de 1h para o A36 e 3h para o CA6NM e 6A e posteriormente análises de polarização potenciodinâmica linear e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). Foi possível observar que a redução da rugosidade superficial (obtida pelo aumento da granulometria da lixa) impactou positivamente no aumento da resistência à corrosão até um ponto limítrofe, na qual maiores reduções de rugosidade apresentam pouco impacto.

Palavras-chave: Rugosidade superficial, Corrosão, Metais.

ABSTRACT

Corrosion is a major problem that directly impacts the application of metallic materials, especially in coastal environments that have high concentrations of Cl^- ions dispersed in the atmosphere. Corrosion is an electrochemical phenomenon directly influenced by the contact area between the metallic material and the corrosive atmosphere. This study proposes to evaluate the impact of the surface roughness that, although invisible to the naked eye, can represent a significant increase in the contact area thus accelerating the corrosive processes. For this, three different metal alloys were used: ASTM A36, ASTM A743 grade CA6NM and ASTM A890 grade 6A immersed in a 0.1M NaCl electrolyte. Surface roughness was created through the surface preparation using 400#, 600# and 1200# grit sandpaper to maintain a regularity of roughness throughout the tests. The tests performed consist of a stabilization of open circuit potential (OCP) of 1h for A36 and 3h for CA6NM and 6A and later analyzes of linear potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). It was possible to observe that the reduction of the surface roughness (obtained by the increase of the sandpaper grit number) had a positive impact on the increase of the corrosion resistance to a border point, in which larger reductions of roughness have little impact.

Keywords: Roughness, Corrosion, Metals.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático da reação de corrosão do ferro	18
Figura 2 - Esquemático de rugosidade superficial.....	19
Figura 3 - Gráfico ilustrando a passividade dos aços ao cromo expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial.....	22
Figura 4 – Família de aços inoxidáveis	23
Figura 5 – Fluxograma da metodologia experimental.....	25
Figura 6 – Célula eletroquímica convencional de três eletrodos.....	27
Figura 7 – Diagrama de Nyquist, com seu circuito equivalente, mostrando o efeito da impedância difusional.....	28
Figura 8 – Comparação das curvas de polarização potenciodinâmica linear dos aços A36, CA6NM e 6A para as lixas de granulometria (a) 400# (b) 600# (c) 1200#	30
Figura 9 – Comparação das curvas de polarização potenciodinâmica linear para diferentes granulometrias de lixa (a) A36 (b) CA6NM (c) 6A	31
Figura 10 – Curva de EIE para lixa de granulometria 400#.....	33
Figura 17 – Módulo da impedância dos os aços 6A, CA6NM e A36 para lixas de granulometrias 400#, 600# e 1200#	34
Figura 12 – Micrografia ótica do aço A36 preparado com lixa de granulometria 400# antes e depois do ensaio de polarização linear, aumento de 200x.....	35
Figura 13 – Micrografia ótica do aço A36 preparado com lixa de granulometria 600# antes e depois do ensaio de polarização linear, aumento de 200x.....	35
Figura 14 – Micrografia ótica do aço A36 preparado com lixa de granulometria 1200# antes e depois do ensaio de polarização linear, aumento de 200x.....	36
Figura 15 – Micrografia ótica do aço CA6NM preparado com lixa de granulometria 400# antes e depois do ensaio de polarização linear, aumento de 200x.....	36
Figura 16 – Micrografia ótica do aço CA6NM preparado com lixa de granulometria 600# antes e depois do ensaio de polarização linear, aumento de 200x.....	37
Figura 17 – Micrografia ótica do aço CA6NM preparado com lixa de granulometria 1200# antes e depois do ensaio de polarização linear, aumento de 200x.....	37
Figura 18 – Micrografia ótica do aço 6A preparado com lixa de granulometria 400# antes e depois do ensaio de polarização linear, aumento de 200x.....	38

Figura 19 – Micrografia ótica do aço 6A preparado com lixa de granulometria 600# antes e depois do ensaio de polarização linear, aumento de 200x.....	38
Figura 20 – Micrografia ótica do aço 6A preparado com lixa de granulometria 1200# antes e depois do ensaio de polarização linear, aumento de 200x.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química inoxidáveis duplex (%p)	24
Tabela 2 – Elementos estabilizadores de austenita e ferrita	24
Tabela 3 – Composição química (%p)	25
Tabela 4 – Média das áreas das amostras	27
Tabela 5 – Potencial de Circuito Aberto – OCP.....	29
Tabela 6 – Densidade de corrente e taxa de corrosão.....	32
Tabela 7 – Resistência à Polarização.....	34

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
EIE	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica
OCP	<i>Open Circuit Potential</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVOS	16
2.1.	Objetivos Gerais	16
2.2.	Objetivos Específicos.....	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1.	Corrosão em Materiais Metálicos	17
3.2.	Rugosidade Superficial	18
3.3.	Classificação dos aços.....	20
3.4.	Aços Inoxidáveis	21
3.4.1.	<i>Aços Inoxidáveis Duplex</i>	23
4.	MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL	25
4.1.	MATERIAIS.....	25
4.2.	METODOLOGIA	25
4.2.1.	<i>PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS</i>	26
4.2.2.	<i>PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA</i>	26
4.3.	ENSAIOS ELETROQUÍMICOS.....	26
4.3.1.	<i>POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA LINEAR</i>	27
4.3.2.	<i>ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA (EIE)</i>	28
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1.	ENSAIOS ELETROQUÍMICOS.....	29
5.1.1.	<i>MONITORAMENTO DO POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO</i>	29

5.1.2.	<i>POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA LINEAR</i>	29
5.1.3.	<i>ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA (EIE)</i>	32
5.2.	MICROSCOPIA ÓTICA	34
6.	CONCLUSÃO	40
7.	TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia a utilização de metais tornou-se fundamental em todos os aspectos devido ao leque de diferentes propriedades dentre elas químicas, mecânicas, elétricas, biocompatibilidade, entre outros. Os metais compõem as construções, os veículos de transporte e até fazem parte do corpo humano através de implantes. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), essas inúmeras aplicações fazem com que o consumo de metais sirva como um indicador de desenvolvimento econômico de um país. O consumo per capita desses metais nos países mais industrializados chega a ser 3 a 6 vezes maior quando comparamos com os países em desenvolvimento (MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS, 2016). Apesar da vasta utilização, ainda existem algumas limitações quanto à aplicação dos metais. Uma dessas limitações é a susceptibilidade à corrosão.

A fim de estudar a relação entre a rugosidade superficial e a corrosão de ligas metálicas, três classes de metais foram selecionadas apresentando diferentes resistências à corrosão: um aço carbono ASTM A36, um aço inoxidável martensítico ASTM A743 e um aço inoxidável super duplex ASTM A890. A relevância desse estudo reside no fato de que a maioria dos metais não recebem um polimento prévio à sua aplicação. Estes adquirem uma rugosidade superficial devido ao desgaste causado por intempéries relacionados ao ambiente de trabalho.

A rugosidade superficial para a condução do estudo foi induzida utilizando lixas d'água com granulometrias de 400#, 600# e 1200#. Os ensaios de corrosão foram conduzidos com solução 0,1M de NaCl visando relacionar a variação da resistência à corrosão através de análises de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e curvas de polarização potenciodinâmica linear.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Estudar o efeito da rugosidade superficial na resistência à corrosão para diferentes tipos de aço.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a rugosidade superficial para as lixas de granulometria 400#, 600# e 1200#;
- Avaliar a influência da rugosidade na resistência à corrosão para os aços ASTM A36, ASTM A743 grau CA6NM e ASTM A890 grau 6A.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Corrosão em Materiais Metálicos

O fenômeno da corrosão é caracterizado pela deterioração dos metais através de reações químicas ou eletroquímicas em um meio corrosivo, sendo geralmente reações espontâneas. Tendo em vista a espontaneidade dessas reações, a maioria dos metais são encontrados na natureza na forma oxidada, como óxidos e sulfetos, visto que esses óxidos apresentam energia livre menor que o elemento em seu estado metálico. Sendo assim, os metais tendem a reagir com o ambiente buscando reduzir seu estado de energia tornando-se assim mais estáveis (GENTIL, 1996).

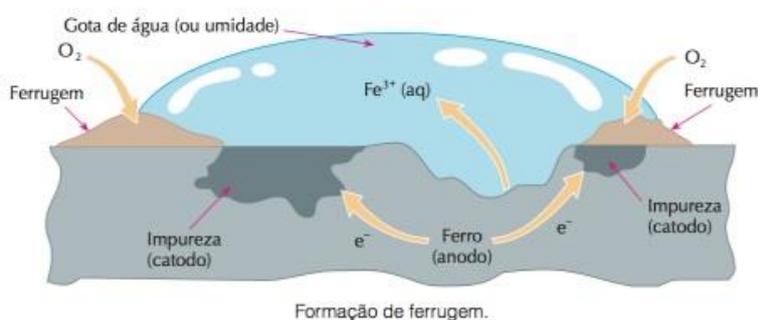
A corrosão pode ser estudada como uma reação simultânea de oxidação-redução na qual existe um elemento que sofre oxidação, perda de elétrons, e um elemento que sofreu redução, ganho de elétrons. O ferro se oxida facilmente quando exposto ao ar úmido, visto que o ferro possui potencial de redução menor que o do oxigênio (GENTIL, 1996).

A presença de um eletrólito, no caso mencionado anteriormente a umidade do ar, é um requisito essencial para que ocorra o processo de corrosão eletroquímico. Na presença de uma fina película de eletrólito, formada pela umidade atmosférica, ocorre o início da corrosão com o equilíbrio das reações catódicas e anódicas. A reação anódica é caracterizada pela dissolução do metal em íons metálicos, já a reação catódica é considerada como a reação de redução do oxigênio. Utilizando o ferro como exemplo, temos as equações (1) e (2) como as reações anódicas e catódicas respectivamente.



Neste caso temos o oxigênio que atua como agente oxidante, espécie química que sofre redução, e o ferro metálico que atua como agente redutor, espécie química que sofre oxidação. Para que ocorra a reação de oxirredução é necessário que se satisfaça algumas condições: existência do contato elétrico entre o cátodo e o ânodo, geralmente é a própria peça metálica, para que ocorra a passagem dos elétrons, e um eletrólito, normalmente gotículas de água ou umidade, para que haja o transporte dos íons (ROBERGE, 2000).

Figura 1 - Esquemático da reação de corrosão do ferro



Fonte: <https://descomplica.com.br/tudo-sobre-enem/novidades/tamojuntoenem-questoes-de-quimica/>

No caso de corrosão atmosférica, quando o metal está exposto à eletrólitos neutros ou levemente ácidos a reação catódica da redução do hidrogênio, representada pela equação 3, pode ser desconsiderada para a maioria dos metais e ligas (ROBERGE, 2000).



A reação de redução do oxigênio é a principal reação de consumo de elétrons, porém, na presença de poluentes atmosféricos, reações envolvendo outros elementos como agentes oxidantes tais como o ozônio, o enxofre e o nitrogênio devem ser levadas em consideração (ROBERGE, 2000).

3.2. Rugosidade Superficial

Como mencionado anteriormente, para que ocorra a corrosão é necessário o contato da peça metálica com um meio corrosivo. Tendo isso em vista, surge outro parâmetro a ser avaliado: a superfície do material. É comum assumirmos que uma superfície é plana e sem imperfeições por falta de imperfeições visíveis à olho nu, porém, quando tratamos de fenômenos de nível microscópico como a corrosão, torna-se necessário analisar a rugosidade superficial de forma mais detalhada.

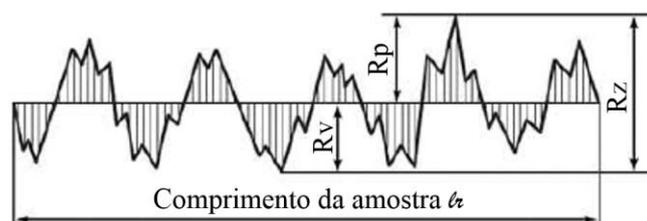
Em seu estudo sobre o efeito do acabamento superficial na corrosão de aço carbono em ambiente de CO_2 , Asma (2011) relatou que, de forma geral, a taxa de corrosão em superfícies rugosas é maior do que em superfícies lisas. Os ensaios foram conduzidos avaliando a corrosão em condições estacionárias e em condições de fluxo utilizando a técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE). Para condições estáticas, a taxa de corrosão variou de 3,3 mm ao ano até 1 mm ao ano, para superfícies com acabamento de granulometria 60# e 1200# respectivamente, já nas condições de fluxo, a

taxa de corrosão variou de 7,8 mm ao ano até 2,5 mm ao ano, para superfícies com acabamento de granulometria 60# e 1200#, respectivamente. Isso ocorre devido ao aumento da área superficial proporcionada pela maior rugosidade.

Tal estudo evidencia a importância da correlação entre o acabamento superficial e a aplicação ao qual o material se destina, visto que a maioria dos materiais metálicos acabam, inevitavelmente, sofrendo desgastes ao longo de sua utilização que alteram a rugosidade superficial. Logo, faz-se necessário investigar a relação entre o acabamento superficial e o comportamento do aço em um meio corrosivo.

Através de um estudo de avaliação o efeito da topografia no comportamento corrosivo de um aço 316L, foi proposto correlacionar a evolução da corrosão por pites com o acabamento superficial do metal, o qual se processa em três etapas: nucleação, crescimento metaestável e crescimento estável (LAGE, MØLLER e FALLESEN, 2015). Burstein e Vines (2001) descreve que a nucleação por pites se dá em sítios de imperfeições que romperam a camada passiva do metal tais como arranhões, inclusões e outros defeitos. Esses sítios são comumente repassivados porém, para certas topografias ou corrente suficiente, ocorrerá propagação metaestável dos pites.

Figura 2 - Esquemático de rugosidade superficial



Fonte: (KEYENCE CORPORATION)

Estudos sugerem que o ângulo de abertura das fendas da rugosidade afeta diretamente na estabilidade dos pites. Fendas que apresentam um ângulo de abertura menor dificultam a difusão dos produtos de corrosão, íons H^+ , Cl^- e Me^+ , para o eletrólito. Devido a maior concentração desses íons, é necessária uma menor corrente, resultando um menor potencial de pite caracterizando um crescimento metaestável do mesmo. O filme superficial de óxido que circunda o pite torna-se cada vez mais frágil, à medida que o pite cresce, até o ponto no qual ele cede, resultando na expansão do defeito superficial. Nesse momento, a difusão dos produtos de corrosão aceleram juntamente com o crescimento do pite, passando para a fase final de crescimento estável (LAGE, MØLLER

e FALLESEN, 2015). Foi observado que uma superfície com melhor acabamento superficial, ou seja, que apresenta menor rugosidade, apresenta um menor surgimento de pites metaestáveis devido ao menor número de sítios disponíveis para nucleação dos mesmos (G.T. BURSTEIN, 1995).

Em seu trabalho sobre o surgimento de rugosidade superficial devido à erosão no aço 304L, Sasaki (1996) observou que o efeito da rugosidade superficial é significativo na corrosão por pites. Comparando duas superfícies preparadas utilizando lixamento d'água com lixas de carbeto de silício de granulometrias 4000# e 180#, foi possível identificar uma redução de 0,44V no potencial de pite. Também foi observado que o potencial de pite decresce linearmente com o aumento da granulometria das lixas.

Pradhan et al. (2018) estudou o efeito da rugosidade superficial na profundidade de penetração da corrosão na superliga IN718 para diferentes acabamentos superficiais utilizando lixas d'água de granulometrias 400#, 600#, 800# e 1000#. As amostras foram revestidas com spray de 100% em peso de NaCl. Utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura, foi identificado que quanto maior a granulometria, menor a penetração da camada oxidada sendo elas, em ordem crescente de granulometria, 32,9 µm, 27,5 µm, 20,5 µm e 12,8 µm.

3.3. Classificação dos aços

O aço é uma liga metálica cujos principais elementos são ferro e carbono, podendo tornar-se uma liga complexa através da adição de outros elementos de liga secundários conferindo novas propriedades ao material.

Podemos classificar os aços de duas formas dependendo de sua composição química, sendo elas o aço carbono e o aço liga (CHIAVERINI, V., 2005).

A classificação do aço carbono é determinada por uma liga ferro-carbono podendo ter teores residuais de alguns elementos (como silício, fósforo, enxofre e manganês) provenientes do processo de fabricação. Quanto à composição do carbono, podemos classificar em três subdivisões: aços contendo teor de carbono inferior a 0,2% são classificados como aços de baixo teor de carbono; aços contendo teor de carbono entre 0,2% e 0,5% são classificados como aços de médio carbono; aços contendo teor de carbono acima de 0,5% são classificados como aços de alto teor de carbono (CHIAVERINI, V., 2005).

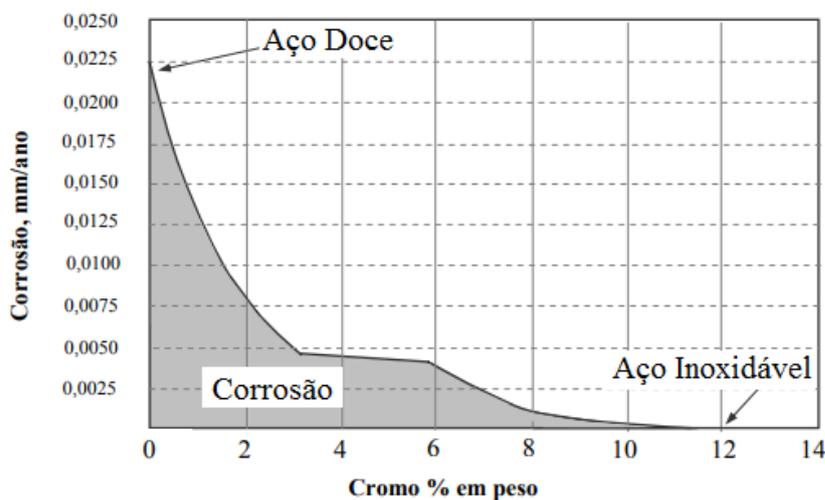
3.4. Aços Inoxidáveis

Estruturas metálicas a base de ferro e carbono sempre apresentaram um inconveniente no que diz respeito à resistência à corrosão, apesar de inúmeros esforços de pesquisadores na área de engenharia de materiais. Foi apenas no início do século XX que ocorreu a descoberta dos aços inoxidáveis simultaneamente em diversos países. Em Sheffield, Inglaterra o pesquisador Harry Brearley, que procurava ligas metálicas para utilizar na fabricação de canos de armas, testou algumas amostras das ligas utilizadas e descobriu que as mesmas não apresentaram problemas de corrosão. Ao analisar as amostras descobriu que o material continha cerca de 13% de cromo, o que iniciou o desenvolvimento de talheres de aço inoxidável, pelo qual a cidade de Sheffield ficou famosa (ATLAS SPECIALTY METALS, 2003).

Foi descoberto que a adição de alguns elementos de liga forma uma fina película de óxido aderente que isola o metal-base do meio corrosivo. Os principais elementos formadores dessa película são o cromo e níquel e, em menor grau, cobre, molibdênio, silício e alumínio (PADILHA, A.F., 1994).

Tomando como base a tabela de potencial padrão de redução, notamos que o cromo é um elemento mais reativo que o ferro, possibilitando a passivação e subsequente formação da camada protetora, contínua e auto reparadora de óxidos de cromo quando exposto ao ar. A propriedade auto reparadora da camada de óxido garante que o metal é resistente à corrosão independentemente da quantidade de material removido de sua superfície (ATLAS SPECIALTY METALS, 2003). O cromo se destaca como elemento protetor principal que compõe os aços inoxidáveis, sendo o mesmo caracterizado por possuir uma percentagem de cromo variando entre 10,5% e 12% dissolvido na matriz, analisando um sistema Fe-Cr em soluções aquosas com pH neutro (PADILHA, A.F., 1994). Para ambientes mais agressivos, o teor de cromo deve ser aumentado, como podemos observar na Figura 3.

Figura 3 - Gráfico ilustrando a passividade dos aços ao cromo expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial.



Fonte: (CHIAVERINI, 1965)

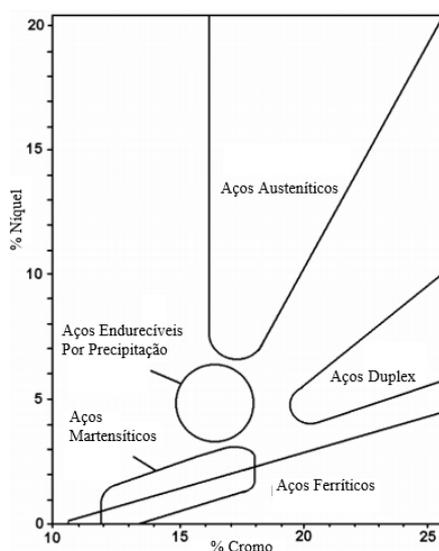
A ação passivante dos elementos de liga que compõem o aço inoxidável depende de diversos parâmetros que podem ser divididos em dois itens principais. O primeiro item se refere às condições da solitação externa, ou seja, características do meio no qual o material está submetido. Dentre elas: composição e concentração química, estado físico do meio, tipo de radiação exposta, temperatura, pressão do ambiente, entre outras. As solitações mecânicas têm grande impacto na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis. Alguns elementos presentes no meio podem comprometer essa resistência e assim acelerar o efeito corrosivo, como por exemplo quando aços inox que apresentam apenas o cromo como agente passivador são pouco resistentes quando expostos a um ambiente contendo cloro (CHIAVERINI, 1965).

Já em relação ao segundo item é levado em consideração que, para uma mesma condição de solitação externa, de maneira geral, quanto maior a quantidade de elementos passivantes presentes na liga metálica, maior será sua resistência à corrosão, desde que estes encontram-se dissolvidos na matriz. Porém, seu efeito passivante irá reduzir de forma proporcional nos casos em que os elementos se encontram na forma de precipitados, como carbonetos, nitretos, sulfetos, boretos e/ou fases intermetálicas. Um exemplo dessa redução da resistência à corrosão é devido à formação de precipitados de carbonetos ricos em cromo do tipo $M_{23}C_6$ nos contornos de grãos de aços inoxidáveis austeníticos que passaram por um aquecimento em temperaturas entre 400 e 850°C. A precipitação dos carbonetos ricos em cromo resulta em um empobrecimento de cromo

nas regiões próximas aos contornos de grãos. Esse processo é conhecido por sensitização (SMITH, W.F., 1993).

Os aços inoxidáveis possuem teor de ferro variando de 50 a 88% de ferro e são classificados em diferentes grupos de acordo com a percentagem dos elementos de liga presentes. Os principais elementos de liga são cromo e carbono, para os inoxidáveis ferríticos e martensíticos, e níquel, para os austeníticos e os duplex (BHADESHIA, H.K.D.H., 2000), como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Família de aços inoxidáveis



Fonte: (ATLAS SPECIALTY METALS, 2003)

3.4.1. Aços Inoxidáveis Duplex

Originalmente desenvolvido na Suécia durante a década de 1930, os aços inoxidáveis duplex apresentam as fases ferrita e austenita em proporções equivalentes, aliando a resistência à corrosão com boas propriedades mecânicas. No início do seu desenvolvimento existia certa dificuldade para atingir o balanço correto entre ferrita e austenita, além disso, não existiam métodos apropriados de descarbonização para reduzir os teores de carbono nos inoxidáveis duplex. Maiores avanços no desenvolvimento de inoxidáveis duplex surgiram na década de 1970 após o surgimento dos processos de carbonização a vácuo e a argônio (ALVAREZ-ARMAS, IRIS, 2007).

Os inoxidáveis duplex possuem maior teor de cromo e molibdênio e um menor teor de níquel quando comparados aos inoxidáveis austeníticos, como podemos observar na Figura 4. Apesar de possuírem restrição de temperatura pela formação de fases frágeis,

os inoxidáveis duplex podem se equiparar aos inoxidáveis austeníticos no que tange a resistência à corrosão com a vantagem de apresentarem maior resistência mecânica no estado recozido (LEAN DUPLEX STAINLESS STEEL, 2012). A Tabela 1 apresenta composições típicas de alguns inoxidáveis duplex.

Tabela 1 – Composição química inoxidáveis duplex (%p)

Família	AISI (USA)	Cr	Mo	Ni	Mn	N
Duplex	2101	21	0	2	5	0,2
	2304	23	0	4	1	0,13
	2205	22	3	6	1	0,17
	2507	25	3,5	7	1	0,25

Fonte: (LEAN DUPLEX STAINLESS STEEL, 2012)

A fim de manter as fases austenita e ferrita em equilíbrio para a obtenção do inoxidável duplex, torna-se importante destacar a influência dos elementos na estabilização das mesmas:

Tabela 2 – Elementos estabilizadores de austenita e ferrita

Fase	Elementos estabilizadores					
Ferrita	Cromo	Silício	Molibdênio	Tungstênio	Titânio	Nióbio
Austenita	Carbono	Níquel	Manganês	Nitrogênio	Cobre	

Fonte: (BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION)

A presença do nitrogênio atua sobre a razão ferrita-austenita e permite a redução dos teores de carbono mantendo as propriedades mecânicas da liga, o que ajuda a contornar problemas de precipitação de carbonetos (GAGNEPAIN, 2008).

4. MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1. Materiais

Foram utilizadas três classificações diferentes de aço: um aço carbono ASTM A36/A36M, um aço inoxidável martensítico ASTM A743/A743M grau CA6NM e um aço inoxidável super duplex ASTM A890/A890M grau 6A. A Tabela 3 apresenta a composição química dos aços utilizados.

Tabela 3 – Composição química (%p)

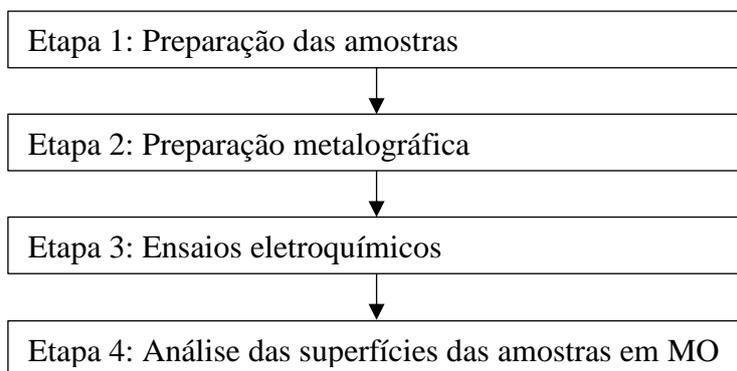
Aço	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W	Fe
A36	0,26	0,85	0,04	0,05	0,4	-	-	-	-	-	-	Bal.
		-										
		1,35										
CA6NM	0,06	1,00	0,04	0,03	1,00	11,5	3,5	0,4	-	-	-	Bal.
						-	-	-				
						14,0	4,5	1,0				
6A	0,03	1,00	0,03	0,025	1,00	24,0	6,5	3,0	0,2	0,5	0,5	Bal.
						-	-	-	-	-	-	
						26,0	8,5	4,0	0,3	1,0	1,0	

Fonte: (ASTM A36/A36M, 2014) (ASTM A743/A743M, 2014) (ASTM A890/A890M -18A, 2018)

4.2. Metodologia

A metodologia experimental utilizada para a realização desse trabalho está ilustrada pelo fluxograma apresentado na Figura 5. As etapas 2 e 4 são importantes para possibilitar a comparação da superfície das amostras antes e depois da etapa de realização dos ensaios eletroquímicos.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia experimental



Fonte: Autor

4.2.1. Preparação das amostras

O material foi recebido em forma de lingote, resultante do processo de fundição, nas dimensões aproximadas de 7x4x5 cm para os aços CA6NM e 6A. Já para o aço A36, o material foi recebido na forma de barra cilíndrica de diâmetro 25mm. O material recebido foi cortado com disco abrasivo de carbetto de silício, utilizando uma máquina *Cut-off* do Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Após o corte, as amostras foram embutidas em resina de cura a frio utilizando um fio de cobre para estabelecer contato elétrico.

4.2.2. Preparação metalográfica

Os corpos de prova foram lixados em uma poltriz com lixas de granulometria 120#, 220#, 320#, 400#, 600# e 1200#. As amostras foram lavadas com água destilada e álcool e secadas com um jato de ar quente imediatamente após cada lixamento. Para cada classificação de aço foram preparados três corpos de provas utilizando lixamento com granulometria final de 400#, 600# e 1200# a fim de analisar a influência da rugosidade superficial nas taxas de corrosão.

4.3. Ensaios eletroquímicos

As técnicas de ensaios eletroquímicos em laboratório foram utilizadas a fim de analisar a influência da rugosidade superficial no comportamento corrosivo dos materiais metálicos. As técnicas de ensaios eletroquímicos realizadas foram: monitoramento do potencial de circuito aberto (OCP), EIE e polarização potenciodinâmica linear. Para as medidas realizadas, utilizou-se um potenciostato/galvanostato modelo PGSTAT30 (Autolab, Metrohm-Eco Chemie) do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) da UFC juntamente com o software Nova 1.11.

A célula eletroquímica convencional de três eletrodos foi utilizada na realização do estudo, sendo os eletrodos: 1) contra eletrodo de platina, 2) eletrodo de referência prata/cloreto de prata ($\text{Ag}_{(s)} / \text{AgCl}_{(s)}$, sat. KCl) e 3) eletrodo de trabalho (amostras utilizadas para análise), como representado na Figura 6. Como eletrólito utilizou-se uma solução 0,1M de NaCl.

Imediatamente antes de cada ensaio, os corpos de prova foram lixados para remoção de possíveis camadas de óxidos, lavados com água destilada e álcool e secadas com um jato de ar quente. A região da interface eletrodo de trabalho/resina foi protegida

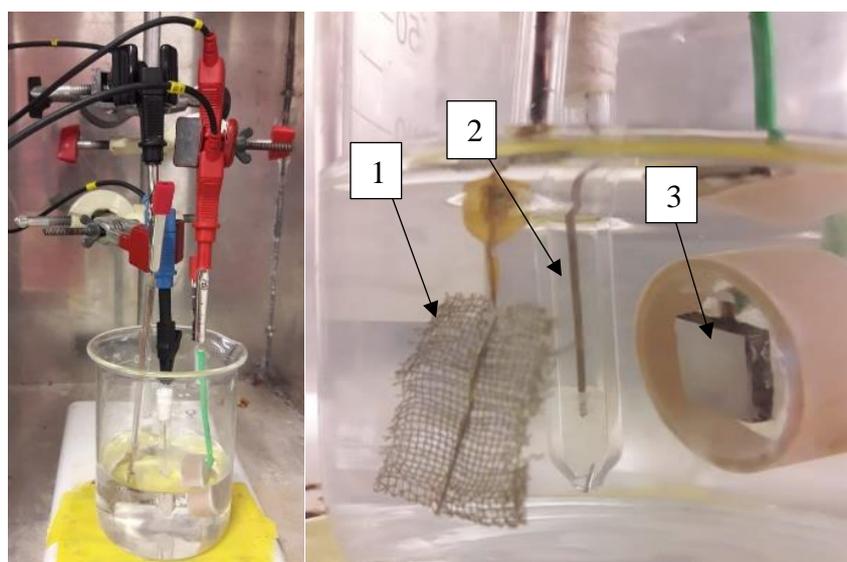
com esmalte visando evitar a corrosão por frestas. Para a realização dos ensaios, a célula eletroquímica foi posta dentro de uma gaiola de Faraday a fim de minimizar interferências externas. As áreas superficiais de cada amostra foram medidas pós a realização de cada ensaio eletroquímico. A Tabela 4 mostra as médias de área de para cada condição analisada. Vale ressaltar que os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e em triplicatas, a fim de garantir a replicabilidade dos resultados.

Tabela 4 – Média das áreas das amostras

Lixa	A36	CA6NM	6A
400#	$0,264 \pm 0,090 \text{ cm}^2$	$0,267 \pm 0,084 \text{ cm}^2$	$0,386 \pm 0,076 \text{ cm}^2$
600#	$0,310 \pm 0,106 \text{ cm}^2$	$0,257 \pm 0,079 \text{ cm}^2$	$0,385 \pm 0,066 \text{ cm}^2$
1200#	$0,243 \pm 0,086 \text{ cm}^2$	$0,251 \pm 0,036 \text{ cm}^2$	$0,417 \pm 0,074 \text{ cm}^2$

Fonte: Autor

Figura 6 – Célula eletroquímica convencional de três eletrodos.



Fonte: Autor

4.3.1. Polarização potenciodinâmica linear

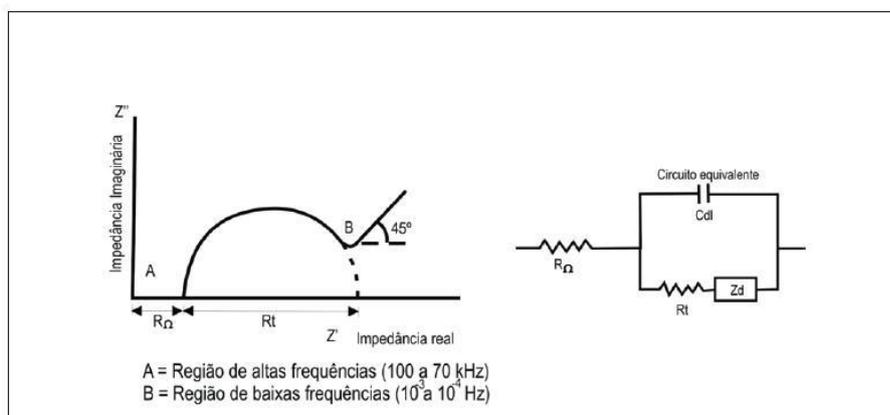
A polarização potenciodinâmica linear foi conduzida a uma velocidade de varredura de 1 mV/s de forma contínua e ascendente do potencial inicial -0,300V a 0,300V, iniciando após 1 hora de imersão no OCP para o aço A36 e após 3 horas de imersão no OCP para os aços CA6NM e 6A, devido à maior resistência à corrosão dos mesmos em relação ao A36. As superfícies das amostras depois dos ensaios foram analisadas por microscopia ótica (MO) utilizando o microscópio óptico Leica DMI 3000M do LPC.

4.3.2. Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE)

Foi utilizada a técnica de EIE visando analisar o comportamento do sistema metal/filme de óxido/solução. Os ensaios foram realizados por meio de uma varredura de frequência utilizando 51 pontos distribuídos iniciando por 100 KHz e finalizando em 10 mHz para o aço A36 e 40 KHz a 6 mHz para os aços CA6NM e 6A, utilizando amplitude senoide de 15 mV, parâmetros adaptados de (ANGÉLICA GOMES, 2013) e Gonçalves Filho (2014).

O diagrama de Nyquist consiste em uma visualização gráfica da impedância imaginária (eixo y) pela impedância real (eixo x). O diâmetro do semicírculo corresponde à resistência de transferência de carga R_t e é equivalente à resistência de polarização R_p . Logo, quanto maior o diâmetro do círculo, maior a R_p e conseqüentemente menor a taxa de corrosão.

Figura 7 – Diagrama de Nyquist, com seu circuito equivalente, mostrando o efeito da impedância difusional



Fonte: (FREIRE, 2005)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Ensaio eletroquímico

5.1.1. Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto

A Tabela 5 mostra o comportamento das amostras após o ensaio de OCP para as preparações superficiais com lixas de granulometria de 400#, 600# e 1200# para os aços A36, CA6NM e 6A em solução de 0,1M NaCl, sendo representados em termos de média das medidas de OCP. O tempo de OCP testado inicialmente foi de 1 hora para as amostras A36 e 3 horas para os aços inoxidáveis CA6NM e 6A.

Em relação aos diferentes tipos de aço, o 6A apresentou menor atividade e o A36 apresentou maior atividade. A variação da rugosidade não apresentou diferenças significativas no potencial de circuito aberto apresentando, variações da ordem de 10^{-2} volts, não sendo possível analisar apenas por esse método.

Tabela 5 – Potencial de Circuito Aberto – OCP

Lixa	A36	CA6NM	6A
400#	$-0,523 \pm 0,032$ V	$-0,103 \pm 0,067$ V	$-0,067 \pm 0,022$ V
600#	$-0,548 \pm 0,054$ V	$-0,096 \pm 0,043$ V	$-0,081 \pm 0,028$ V
1200#	$-0,525 \pm 0,021$ V	$-0,126 \pm 0,025$ V	$-0,087 \pm 0,015$ V

Fonte: Autor

5.1.2. Polarização Potenciodinâmica Linear

As Figuras 8 e 9 mostram o comportamento das amostras durante o ensaio de polarização potenciodinâmica linear para os aços A36, CA6NM e 6A com preparações superficiais utilizando lixas de granulometria de 400#, 600# e 1200# em solução de 0,1M NaCl.

Através dos valores de densidade de corrente é possível identificar se a superfície analisada é mais ou menos ativa que outra, ou seja, mais passível ou não de sofrer corrosão. Quanto maior a densidade de corrente apresentado pela amostra, mais ativa é sua superfície logo, sofre mais corrosão como podemos observar pela equação 4.

$$i_L = \frac{zFDa_o}{(1-t)\sigma} \quad (4)$$

Onde: i_L é a densidade de corrente limite;

a_o é a atividade;

z é o número de elétrons transferidos;

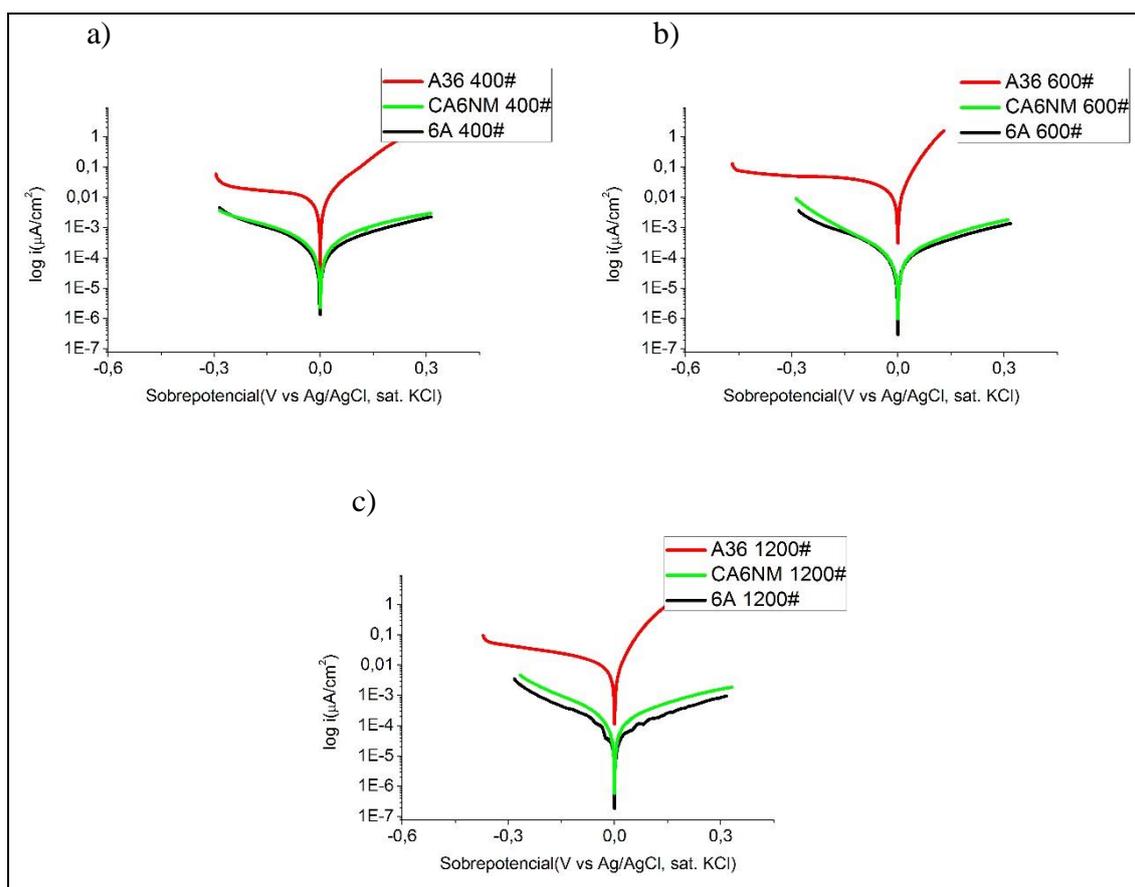
F é a constante de Faraday ($F= 96489$ C);

σ é a espessura da camada de difusão;

t é o número de transporte (migração dos íons).

A Figura 8 mostra que, comparando os aços entre si, o aço 6A apresenta menor densidade de corrente, significando uma maior resistência à corrosão dentre os três aços analisados, seguido pelo aço CA6NM e por último o aço A36, que apresentou menor resistência à corrosão dentre os três.

Figura 8 – Comparação das curvas de polarização potenciodinâmica linear dos aços A36, CA6NM e 6A para as lixas de granulometria (a) 400# (b) 600# (c) 1200#



Fonte: Autor

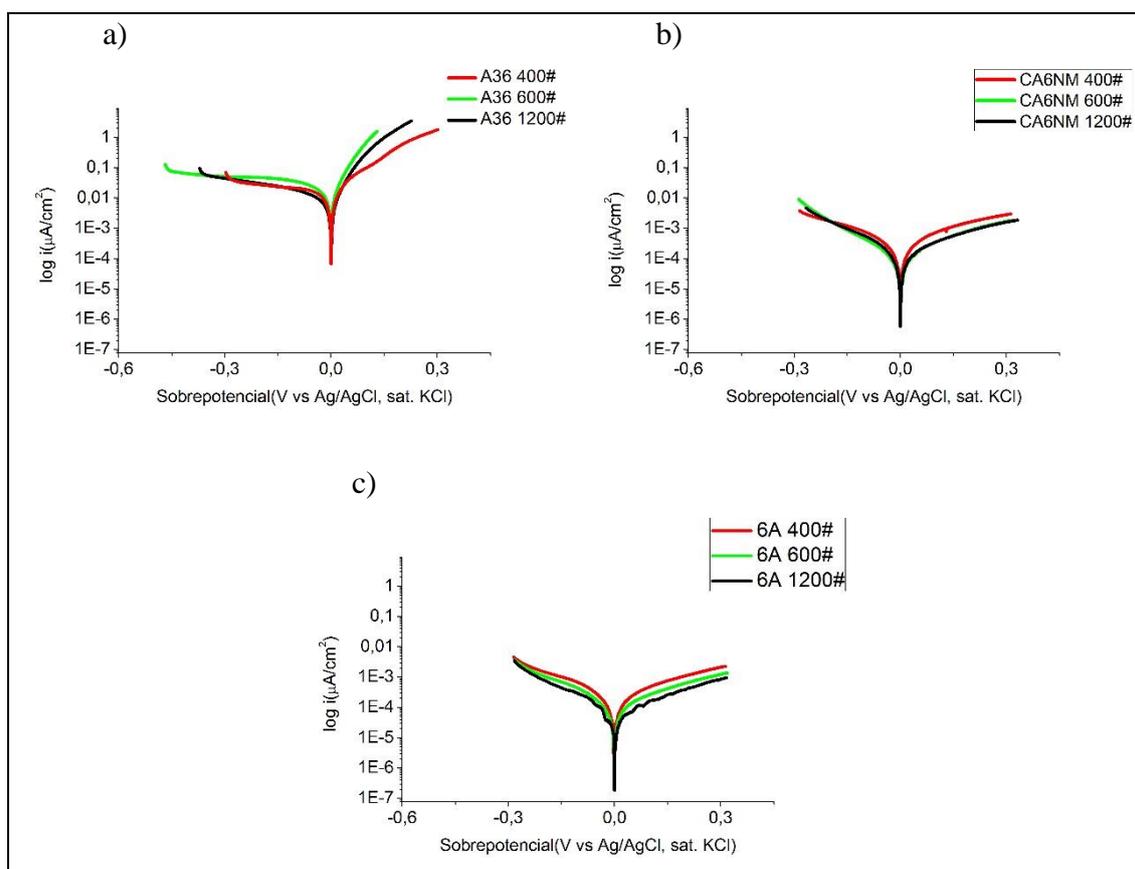
Para o aço carbono A36, a influência da rugosidade não foi perceptível como podemos observar na Figura 9a. Isso se deve à baixa resistência à corrosão do mesmo, visto que em sua composição não existem quantidades significantes de elementos

formadores de camada passivadora, logo, sua corrosão ocorre de forma mais acentuada, quando comparado aos outros aços analisados.

Para o aço inoxidável martensítico CA6NM, a influência da rugosidade foi mais perceptível quando variamos da lixa de granulometria 400# para 600#, apresentando uma queda na densidade de corrente. Já para a variação da lixa de granulometria 600# para 1200# observou-se uma densidade de corrente muito próxima, indicando que a variação na rugosidade, neste caso, não é um fator determinante para a taxa de corrosão, como podemos observar na Figura 9b.

Para o aço inoxidável super duplex, foi possível observar uma queda na densidade de corrente ao alterar entre as três lixas de granulometrias 400#, 600# e 1200#, indicando que, neste caso, a rugosidade é um fator que impacta na resistência à corrosão, como podemos observar na Figura 9c.

Figura 9 – Comparação das curvas de polarização potenciodinâmica linear para diferentes granulometrias de lixa (a) A36 (b) CA6NM (c) 6A



Fonte: Autor

Utilizando a ferramenta de análise de inclinação *Tafel* de taxa de corrosão nos gráficos de polarização disponível no software de análise eletroquímica Nova 1.11, foi possível determinar a densidade de corrente e a taxa de corrosão. A Tabela 6 mostra que, com o incremento da granulometria da lixa, ocorre uma redução tanto na densidade de corrente quanto na taxa de corrosão para os aços analisados, evidenciando uma melhoria resistência à corrosão dos mesmos.

Tabela 6 – Densidade de corrente e taxa de corrosão

Lixa	A36		CA6NM		6A	
	J_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	taxa de corrosão mm/ano	J_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	taxa de corrosão mm/ano	J_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	taxa de corrosão mm/ano
400#	5,26	6,11E-02	0,144	13,2E-04	0,052	6,03E-04
600#	1,73	2,01E-02	0,013	1,46E-04	0,043	4,97E-04
1200#	0,58	0,67E-02	0,009	1,01E-04	0,031	3,60E-04

Fonte: Autor

5.1.3. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

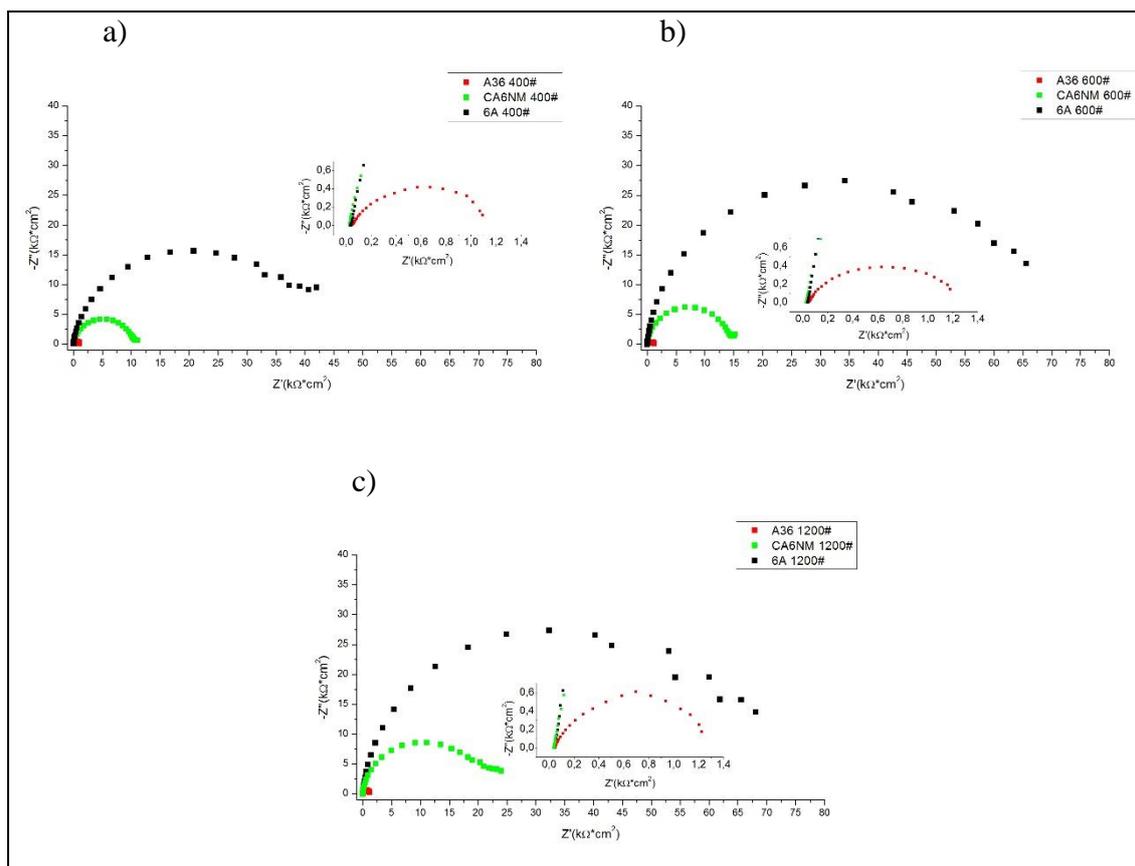
A Figura 10 mostra o diagrama de Nyquist que representa o comportamento das amostras durante o ensaio de EIE para os aços A36, CA6NM e 6A com preparações superficiais utilizando lixas de granulometria de 400#, 600# e 1200# em solução 0,1M NaCl. Comparando os aços entre si, o aço 6A apresenta maior valor de impedância, significando uma maior resistência à corrosão dentre os três aços analisados, seguido pelo aço CA6NM e por último o aço A36, que apresentou menor resistência à corrosão dentre os três.

Ainda analisando a figura citada anteriormente, é possível observar que para a mudança de rugosidade da lixa de granulometria de 400# para 600#, houve um aumento considerável no diâmetro do semicírculo para as amostras do aço 6A, indicando uma melhoria na resistência à corrosão, reafirmando os resultados obtidos pelas curvas de polarização. Já na alteração de granulometria de lixa de 600# para 1200# a variação do diâmetro do semicírculo não apresentou mudanças significativas, indicando um patamar no qual a rugosidade não exerce influência significativa na taxa de corrosão.

Para o aço CA6NM, ocorre um aumento no diâmetro do semicírculo para as três granulometrias de lixa, porém de intensidade menor do que a observada para o aço 6A.

Já para o aço A36, o diagrama de Nyquist se manteve constante com apenas uma leve perturbação para a amostra de granulometria de lixa 1200#, indicando que a rugosidade não apresenta um forte impacto na resistência à corrosão do mesmo, confirmando os resultados obtidos nas curvas de polarização.

Figura 10 – Comparação das curvas EIE dos aços A36, CA6NM e 6A para as lixas de granulometria (a) 400# (b) 600# (c) 1200#



Fonte: Autor

A resistência à polarização é um método de monitoramento da taxa de corrosão e indica a resistência à corrosão de materiais em meios aquosos (NIINOMI, 2010).

A Tabela 7 mostra os valores de resistência à polarização para os aços avaliados em diferentes rugosidades, sendo possível observar que o aumento da granulometria da lixa impacta de forma a aumentar a resistência à corrosão. Novamente, para o aço A36, a diferença foi mínima.

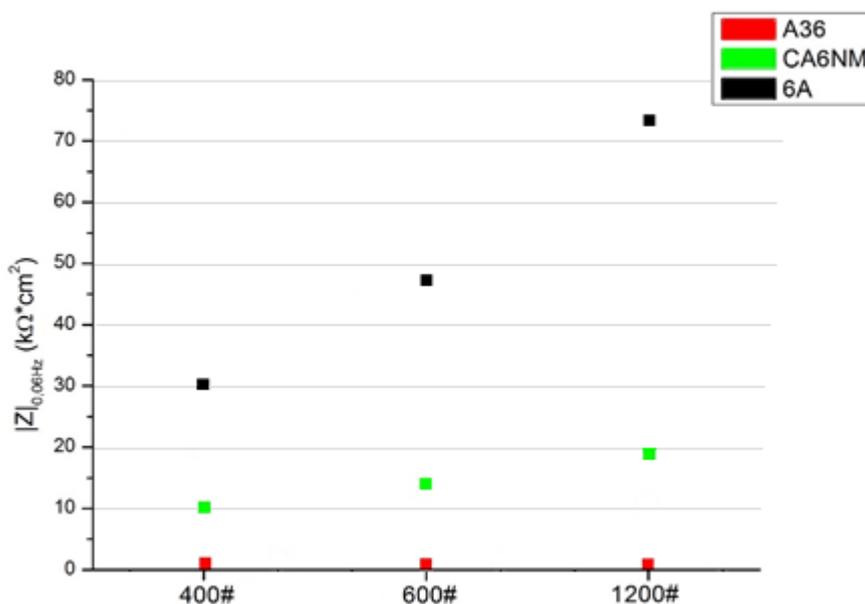
Tabela 7 – Resistência à Polarização

Lixa	A36	CA6NM	6A
	Rp ($k\Omega \cdot cm^2$)	Rp ($k\Omega \cdot cm^2$)	Rp ($k\Omega \cdot cm^2$)
400#	1,11	10,75	40,99
600#	1,23	14,67	64,01
1200#	1,28	22,32	69,38

Fonte: Autor

A fim de facilitar a análise, foi obtido o gráfico do módulo da impedância na frequência de 0,06 Hz pela granulometria da lixa, Figura 11. É possível observar que ao aumentar a granulometria da lixa, o módulo da impedância aumentou, indicando um aumento na resistência à corrosão para os aços 6A e CA6NM. Já para o aço A36 o aumento foi irrisório, reafirmando a influência quase nula da rugosidade na resistência à corrosão.

Figura 11 – Módulo da impedância dos aços 6A, CA6NM e A36 para lixas de granulometrias 400#, 600# e 1200#



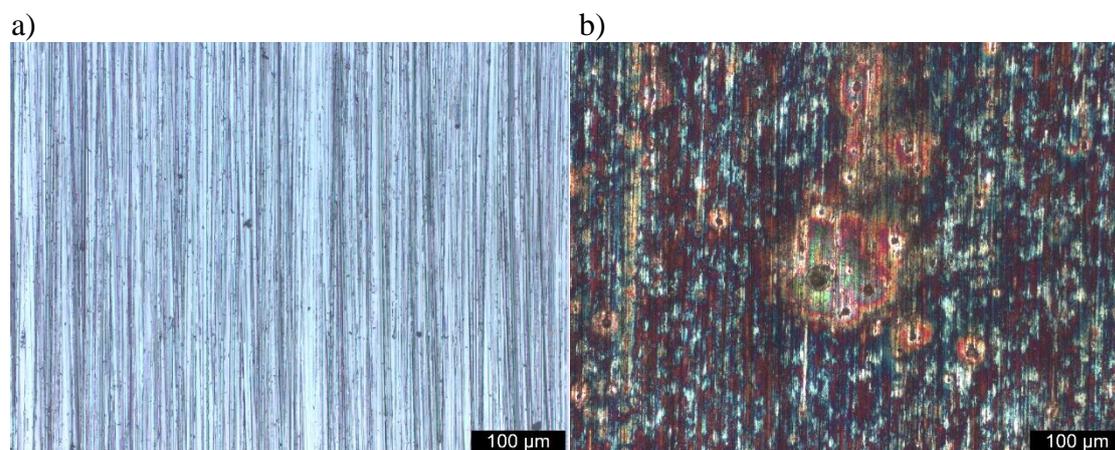
Fonte: Autor

5.2. Microscopia Ótica

Foram tiradas imagens de microscopia ótica antes e depois do ensaio de polarização potenciodinâmica linear para avaliar a alteração superficial após o ensaio.

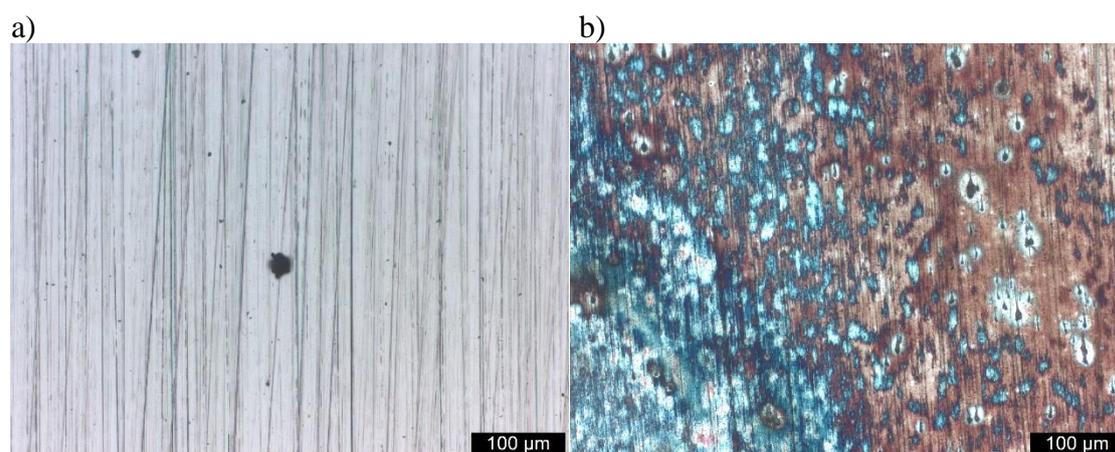
As Figuras 12 a 14 apresentam a superfície do aço A36 para diferentes preparações superficiais. É perceptível o efeito da corrosão, via microscopia ótica, apenas para o aço A36, devido à sua menor resistência à corrosão.

Figura 12 – Micrografia ótica do aço A36 preparado com lixa de granulometria 400# a) antes do ensaio de polarização linear, b) depois do ensaio de polarização linear. Aumento 200x



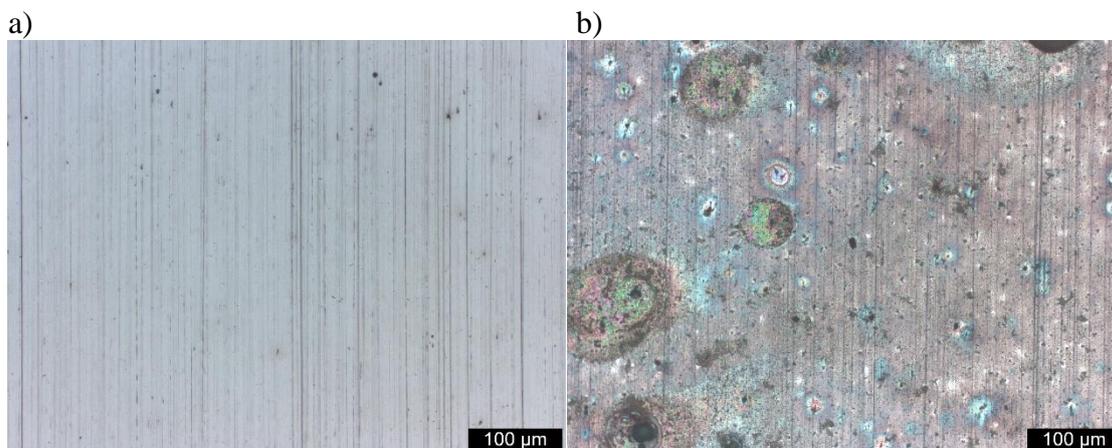
Fonte: Autor

Figura 13 – Micrografia ótica do aço A36 preparado com lixa de granulometria 600# a) antes do ensaio de polarização linear, b) depois do ensaio de polarização linear. Aumento 200x



Fonte: Autor

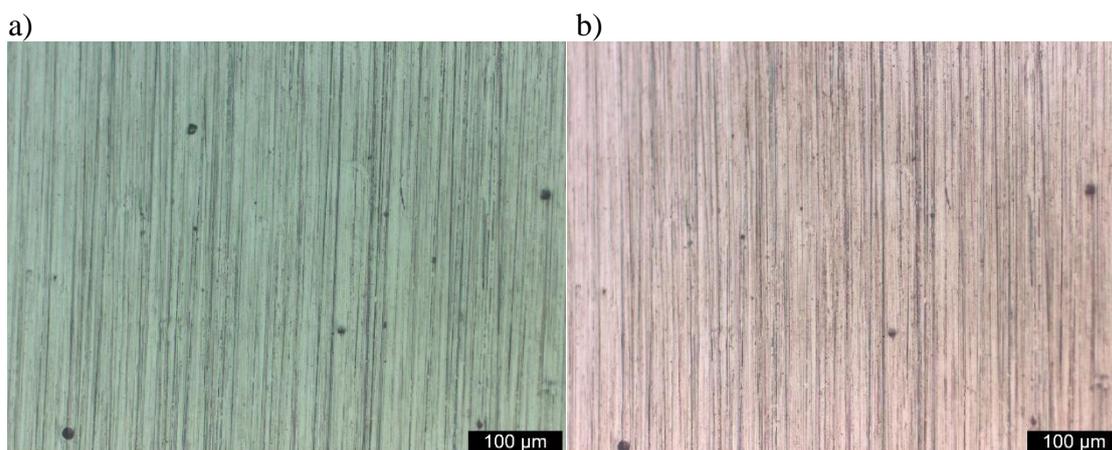
Figura 14 – Micrografia ótica do aço A36 preparado com lixa de granulometria 1200# a) antes do ensaio de polarização linear, b) depois do ensaio de polarização linear. Aumento 200x



Fonte: Autor

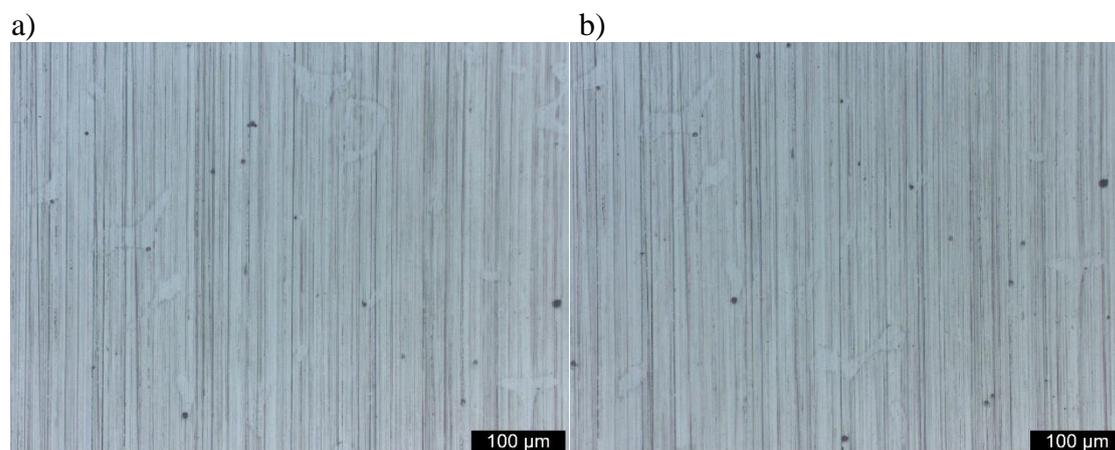
Não foi possível identificar a corrosão dos aços CA6NM e 6A via microscopia ótica devido à elevada resistência à corrosão dos mesmos e devido à baixa concentração da solução, 0,1M NaCl, Figuras 15 a 20. Os pontos mais escuros nessas amostras apresentam características de inclusões, sendo sítios preferenciais para nucleação de pites de corrosão.

Figura 15 – Micrografia ótica do aço CA6NM preparado com lixa de granulometria 400# a) antes do ensaio de polarização linear, b) depois do ensaio de polarização linear. Aumento 200x



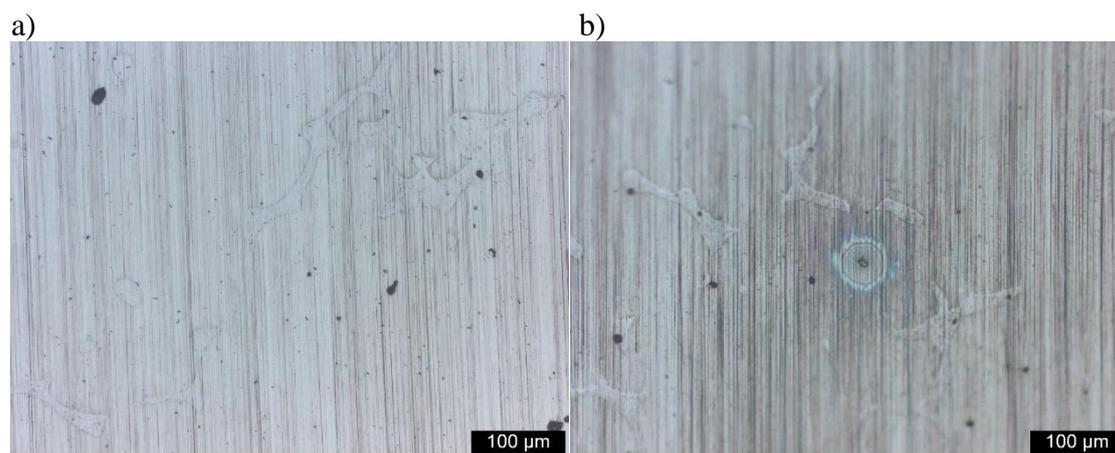
Fonte: Autor

Figura 16 – Micrografia ótica do aço CA6NM preparado com lixa de granulometria 600#
a) antes do ensaio de polarização linear, b) depois do ensaio de polarização linear.
Aumento 200x



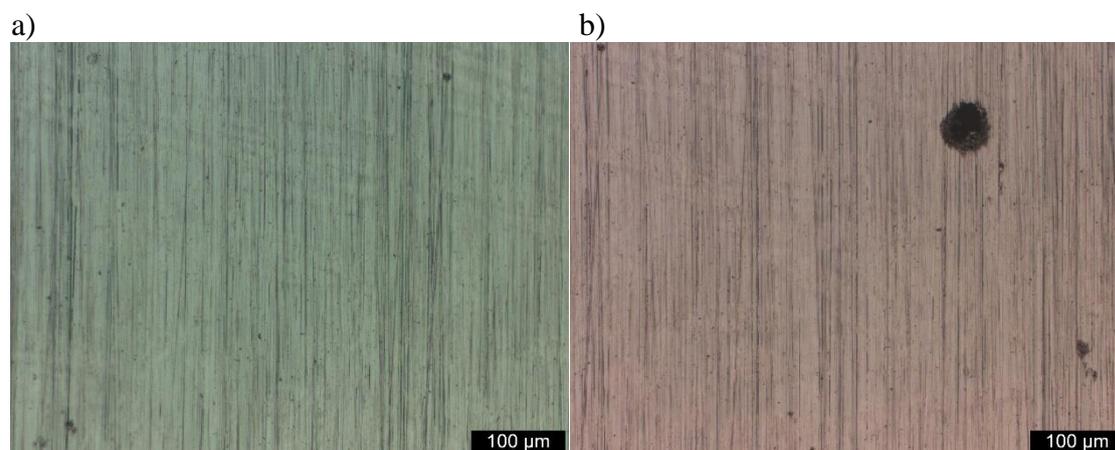
Fonte: Autor

Figura 17 – Micrografia ótica do aço CA6NM preparado com lixa de granulometria 1200#
a) antes do ensaio de polarização linear, b) depois do ensaio de polarização linear.
Aumento 200x



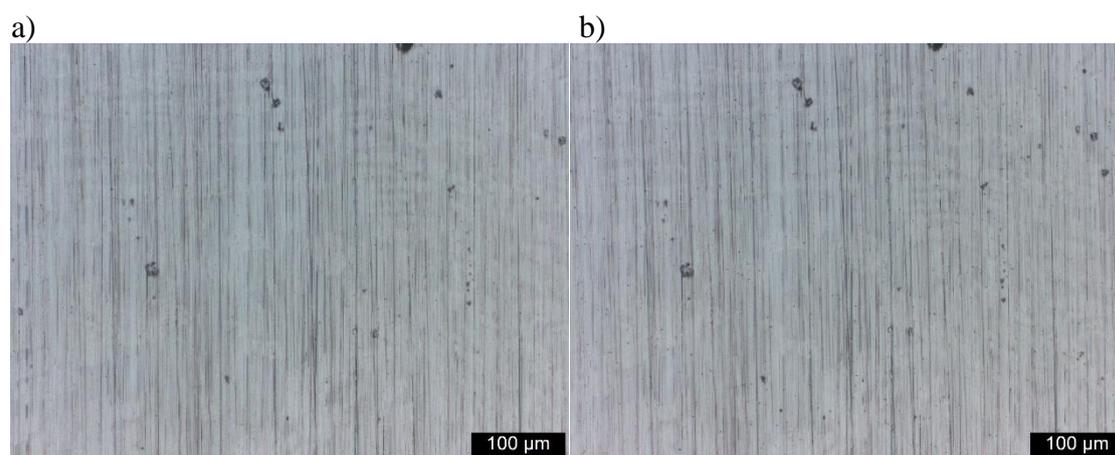
Fonte: Autor

Figura 18 – Micrografia ótica do aço 6A preparado com lixa de granulometria 400# a) antes do ensaio de polarização linear, b) depois do ensaio de polarização linear. Aumento 200x



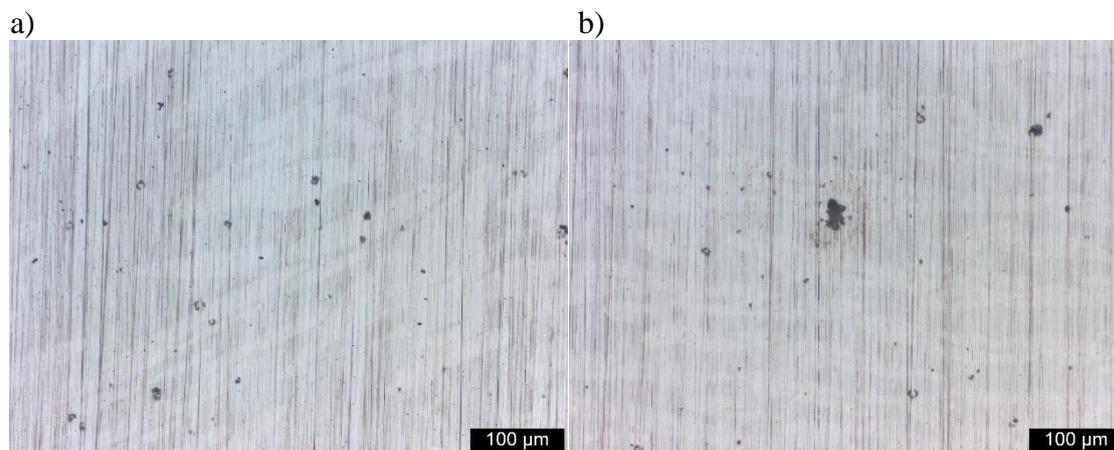
Fonte: Autor

Figura 19 – Micrografia ótica do aço 6A preparado com lixa de granulometria 600# a) antes do ensaio de polarização linear, b) depois do ensaio de polarização linear. Aumento 200x



Fonte: Autor

Figura 20 – Micrografia ótica do aço 6A preparado com lixa de granulometria 1200# a) antes do ensaio de polarização linear, b) depois do ensaio de polarização linear. Aumento 200x



Fonte: Autor

6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos é possível extrair as seguintes conclusões:

- As medidas de OCP não evidenciaram alterações conclusivas na resistência à corrosão ao variar a rugosidade. Apesar disso, fornece informações importantes sobre a resistência à corrosão ao variar a composição do aço, indicando que o aço inoxidável super duplex 6A é o menos ativo, seguido pelo inoxidável martensítico CA6NM e por último o aço carbono A36. Além disso, a correta utilização do ensaio de OCP é uma ferramenta fundamental para a condução dos ensaios subsequentes.
- Em relação aos gráficos de polarização, a rugosidade apresentou influencia na resistência à corrosão para os aços CA6NM e 6A, sendo percebido mais fortemente na transição entre as lixas de granulometria 400# e 600#, levando a crer que a alteração da rugosidade variando a granulometria de 600# para 1200# pouco impacta na resistência à corrosão. Devido à elevada cinética de corrosão do aço A36 não foi possível observar uma ligação entre a rugosidade e a resistência à corrosão apenas por este método.
- Os resultados de densidade de corrente e taxa de corrosão (mm/ano) permitiram identificar que, a redução da rugosidade superficial impacta positivamente na resistência à corrosão para os três aços analisados.
- Os resultados de EIE verificaram que existe uma forte ligação entre a alteração da rugosidade utilizando a lixa de 400# e 600#, porém, para a alteração de 600# para 1200# esse efeito é reduzido. Esse resultado foi confirmado com a análise da resistência à polarização (R_p) e da análise do módulo da impedância.
- A microscopia ótica não foi capaz de relacionar o efeito da rugosidade na taxa de corrosão visto que, para o aço A36 o processo de corrosão ocorre em uma taxa muito elevada e para os aços CA6NM e 6A ocorre em uma taxa muito lenta para a solução de concentração utilizada nesse estudo.
- Em suma, a rugosidade superficial demonstra impactos significativos na taxa de corrosão até certo ponto, o qual podemos denominar ponto limítrofe de rugosidade, na qual demais reduções de rugosidade serão cada vez mais imperceptíveis. Isso ocorre devido à variação da área ativa que diminui com a redução da rugosidade, reduzindo assim a área de contato do metal com a atmosfera corrosiva.

7. TRABALHOS FUTUROS

Avaliar essa ligação entre a rugosidade superficial e a taxa de corrosão para diferentes meios, a fim de determinar se o efeito da rugosidade é potencializado na presença de maiores concentrações de íons.

Utilizar das outras técnicas de microscopia, visto que o microscópio ótico não foi capaz de detectar fortes efeitos da corrosão nos aços inoxidáveis utilizados para o estudo.

ALVAREZ-ARMAS, IRIS. Duplex Stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys. **Bentham Science Publishers Ltd**, 2007.

ANGÉLICA GOMES, E. **Análise comparativa da resistência à corrosão de aços carbono em ensaios de campo e testes eletroquímicos**. Belo Horizonte: UFMG, v. Dissertação (Mestrado), 2013.

ASM INTERNATIONAL. **Austenitic Stainless Steels**. [S.l.]: [s.n.], 2008.

ASMA, R. B. A. N.; YULI, P. A.; MOKHTAR, C. I. Study on the Effect of Surface Finish on Corrosion of Carbon Steel in CO₂ Environment. **Journal of Applied Sciences**, 2011. 2053-2057.

ASTM A36/A36M. ASTM A36/A36M - 14 Standard Specification for Carbon Structural Steel. **ASTM International**, 2014.

ASTM A743/A743M. ASTM A 743/A743M - 17 Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application. **ASTM International**, 2014.

ASTM A890/A890M -18A. ASTM A890/A890M -18a Standard Specification for Castings, Iron-Chromium-Nickel-Molybdenum Corrosion-Resistant, Duplex (Austenitic/Ferritic) for General Application. **ASTM International**, 2018.

ATLAS SPECIALTY METALS. **Technical Handbook of Stainless Steels**. Melbourne, Victoria: Atlas Specialty Metals, 2003. 45 p.

BHADESHIA, H.K.D.H. <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2000/C9/lectures45.pdf>. **Phase Transformations and Complex Properties**, 2000.

BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION. Duplex Stainless Steels - A Simplified Guide. **British Stainless Steel Association**. Disponível em: <<https://www.bssa.org.uk/topics.php?article=668>>.

BURSTEIN, G. T.; VINES, S. P. Repetitive Nucleation of Corrosion Pits on Stainless Steel and the Effects of Surface Roughness. **The Electrochemical Society**, 2001. B504-B516.

CHIAVERINI, V. **Aços-Carbono e Aços-Liga**: Características Gerais, Tratamentos Térmicos, Principais Tipos. 2. ed. ed. São Paulo: ABM, 1965.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. ed. São Paulo: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

DESCOMPLICA. Curso pré-vestibular Descomplica. **Site do Descomplica**. Disponível em: <<https://descomplica.com.br/tudo-sobre-enem/novidades/tamojuntoenem-questoes-de-quimica/>>. Acesso em: 13 set. 2018.

FREIRE, K. R. R. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE INIBIDORES DE CORROSÃO EM ARMADURAS DE CONCRETO**. Curitiba: [s.n.], 2005.

G.T. BURSTEIN, P. C. P. Surface Roughness and the Metastable Pitting of Stainless Steel in Chloride Solutions. **Corrosion**, 1995. 380-385.

GAGNEPAIN, J.-C. duplex stainless steels: success story and growth perspectives. **Stainless Steel World America**, 2008.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3a. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.

GONÇALVES FILHO, G. P. **ESTUDO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO ASTM A743 CA-6NM**. Fortaleza: UFC, v. Dissertação (Mestrado), 2014.

KEYENCE CORPORATION. Keyence. **Site da Keyence**. Disponível em: <<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/maximum-height-of-profile.jsp>>. Acesso em: 13 set. 2018.

LAGE, R.; MØLLER, P.; FALLESEN, H. E. The effect of surface treatment and topography on corrosion behavior of EN 1.4404 stainless steel. **Materials and Corrosion**, 66, n. 10, 2015. 1060-1067.

LEAN DUPLEX STAINLESS STEEL. **Total Materia**, 2012. Disponível em: <www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=EN&NM=364>.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Site do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços**, 2016. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/noticias/9->

assuntos/categ-comercio-exterior/477-metarlurgia-e-siderurgia>. Acesso em: 30 nov. 2018.

NIINOMI, M. (Ed.). **Metals for Biomedical Devices**. Boca Raton: Elsevier, 2010.

P. C. PISTORIUS, G. T. B. Metastable pitting corrosion of stainless steel and the transition to stability. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. A**, 1992. 531-559.

PADILHA, A.F. **Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades**. São Paulo: Hemus, 1994.

PRADHAN, D. et al. Effect of surface roughness on corrosion behavior of the superalloy IN718 in simulated marine environment. **Journal of Alloys and Compounds**, 2018. 250-263.

ROBERGE, P. R. **Handbook of Corrosion Engineering**. New York: Mc-Graw Hill Companies, 2000.

SASAKI, K.; BURSTEIN, G.T. The generation of surface roughness during slurry erosion-corrosion and its effect on the pitting potential. **Corrosion Science**, 38, n. 12, 1996. 2111-2120.

SMITH, W.F. **Structure and Properties of Engineering Alloys**. 2. ed. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1993.

STAVANGER STEEL AS. **Steel Handbook Materials Reference Book**. Jørpeland, Norway: Stavanger Steel As, 2017.