

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

GUILHERME COUTINHO BORGES

**ESTUDO DE CORROSÃO DE REVESTIMENTO
FERRO/NÍQUEL/CROMO EM SUBSTRATO DE AÇO DOMEX 700**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2019

GUILHERME COUTINHO BORGES

**ESTUDO DE CORROSÃO DE REVESTIMENTO
FERRO/NÍQUEL/CROMO EM SUBSTRATO DE AÇO DOMEX 700**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, Coordenação de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Viviane Teleginski Mazur

GUARAPUAVA

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE CORROSÃO DE REVESTIMENTO FERRO/NÍQUEL/CROMO EM SUBSTRATO DE AÇO DOMEX 700

por

GUILHERME COUTINHO BORGES

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado(a) em 27 de junho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Viviane Teleginski Mazur
Prof.(a) Orientador(a)

Rolf de Campos Intema
Membro titular

Sílvia do Nascimento Rosa
Membro titular

Aldo Przybysz
Coordenador de Curso

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

BORGES, Guilherme. **ESTUDO DE CORROSÃO DE REVESTIMENTO FERRO/NÍQUEL/CROMO EM SUBSTRATO DE AÇO DOMEX 700**. 2019. 42. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

O aço DOMEX 700 foi desenvolvido para substituir os aços carbono usuais, sendo conhecido como aço de alta resistência e baixa liga, devido a pequena porcentagem de elementos de liga em sua composição, além de resistência elevada quando comparado a aços carbonos, sendo caracterizado por grãos finos de ferrita. Neste trabalho, foi aplicado um revestimento de ferro/níquel/cromo utilizando a técnica de plasma *magnetron sputtering*, com o objetivo de se estudar os efeitos do revestimento na taxa de corrosão do material. Para a análise foram utilizadas técnicas eletroquímicas em uma solução aerada de NaCl (3,5%), à temperatura ambiente, incluindo medida do potencial de circuito aberto ou potencial de corrosão, micropolarização e macropolarização. Com os dados experimentais foi calculada a taxa de corrosão em mm/ano tanto do metal base quanto para o revestimento. Além disso, análises metalográficas da microestrutura do aço foram realizadas utilizando microscopia óptica e a composição química foi determinada através de fluorescência de raios X. Os resultados de corrosão obtidos indicam que o metal base possui taxa de corrosão de 0,01 mm/ano enquanto que o material com o revestimento apresentou taxa de corrosão de 0,05 mm/ano. A redução na taxa de corrosão foi associada a formação de um revestimento não homogêneo, havendo falhas no crescimento do revestimento, o que gerou corrosão acentuada nos interstícios expostos do metal base, uma vez que a análise gráfica de polarização indica que a natureza das reações de oxi-redução se manteve.

Palavras-chave: DOMEX. Revestimento. Polarização. Corrosão. Plasma magnetron sputtering. Taxa de corrosão.

ABSTRACT

BORGES, Guilherme. **CORROSION STUDY OF IRON / NICKEL / CHROME COATING IN DOMEX 700 STEEL SUBSTRATE**. 2019. 42. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Mechanical Engineering - Federal University of Technology - Paraná. Guarapuava, 2019.

DOMEX 700 steel was developed to replace the usual carbon steels, being known as high strength steel and low alloy, due to the small percentage of alloying elements in its composition, besides high resistance when compared to carbon steels, being characterized by ferrite fine grains. In this work, an iron / nickel / chromium coating was deposited using plasma magnetron sputtering, aiming to study the coating effects on the corrosion rate. For the analysis, electrochemical techniques were used in an aerated solution of NaCl (3.5%), at room temperature, including measurement of open circuit potential, micropolarization and macropolarization. With the experimental data, the corrosion rate in mm / year of both the base metal and the coating were calculated. In addition, metallographic analyzes of the steel microstructure were performed using optical microscopy and the chemical composition was determined by X-ray fluorescence. The obtained corrosion results indicate that the base metal has a corrosion rate of 0.01 mm / year while the material with the coating had a corrosion rate of 0.05 mm / year. The reduction in the corrosion rate was associated with the formation of a non-homogeneous coating, with flawed coating growth, which generated sharp corrosion in the exposed interstices of the base metal, since the graphical polarization analysis indicates that the nature of the oxy-reduction reactions was maintained.

Keywords: DOMEX. Coating. Polarization. Corrosion. Plasma magnetron sputtering. Corrosion rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Micrografia do aço DOMEX 700.....	12
Figura 2 – Processos de deposição de revestimentos a plasma.....	13
Figura 3 – Estágios de formação de revestimentos depositados via PMS.....	14
Figura 4 – Desenho esquemático do reator PMS.....	15
Figura 5 – Célula eletroquímica composta pela cuba, contra-eletrodo, de referência e de trabalho	18
Figura 6 – Medição da curva de polarização.....	20
Figura 7 – Micropolarização de ± 10 mV para os eletrodos estudados versus ECS .	20
Figura 8 – Macropolarização de ± 100 mV para os eletrodos estudados versus ECS	21
Figura 9 – Determinação das inclinações de Tafel na macropolarização	21
Figura 10 – (A) Amostras antes do processo de retificação, (B) retificadora utilizada, (C) amostra sendo retificada.	23
Figura 11 – Processo de deposição a plasma do revestimento de ferro/níquel/cromo. No detalhe o corpo de prova utilizado para verificar a deposição.	24
Figura 12 – Amostras após aplicação do revestimento.....	25
Figura 13 – Fotografia da célula eletroquímica, UNICENTRO.	26
Figura 14 – Microscópio ótico, UTFPR-GP.	27
Figura 15 – (A) Amostra polida e (B) amostra após ataque químico.....	28
Figura 16 - Equipamento de fluorescência de raios X, OXFORD instruments.	29
Figura 17 – Medida de potencial de corrosão E_{corr} em função do tempo para o material base e para o material revestido.	30
Figura 18 – Medida de micropolarização para o material base e para o material revestido.....	31
Figura 19 - Gráfico de micropolarização com ajuste linear indicado	32
Figura 20 - Valores dos ajustes lineares, Valores para material revestido e material base de cima para baixo.	32
Figura 21 – Corrosão galvânica do metal revestido	33
Figura 22 – Medida de macropolarização para o material base e para o material revestido.....	34
Figura 23 – Microestrutura do aço DOMEX 700.....	35
Figura 24 – (A) Fotografia do metal base após ensaios de corrosão. (B) e (C) regiões ampliadas no microscópio	36
Figura 25 – Superfície do material revestido com aproximação microscópica.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Série de potenciais de eletrodo padrão	17
Tabela 2 – Resultados eletroquímicos das análises de corrosão.....	35
Tabela 3 – Análise de elementos químicos do aço DOMEX 700, por fluorescência de raios X.....	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	9
2.1 OBJETIVO GERAL	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3 JUSTIFICATIVA	10
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	11
4.1 AÇO DOMEX 700	11
4.2 DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS POR PLASMA.....	12
4.3 CORROSÃO	15
4.3.1 Revestimento de ferro/níquel/cromo	17
4.4 CÉLULA ELETROQUÍMICA E TÉCNICAS DE ANÁLISE DE CORROSÃO	18
4.4.1 Potencial de corrosão	19
4.4.2 Micropolarização.....	19
5 METODOLOGIA.....	23
5.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	23
5.2 DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO	24
5.3 SISTEMA DE PLASMA MAGNETRON SPUTTERING.....	25
5.4 ANÁLISE DE CORROSÃO	26
5.5 ANÁLISES DE MICROSCOPIA ÓPTICA.....	27
5.6 ANÁLISES DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	28
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
6.1 POTENCIAL DE CORROSÃO.....	30
6.2 MICROPOLARIZAÇÃO.....	31
6.3 MACROPOLARIZAÇÃO	33
6.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA	35
6.5 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA APÓS CORROSÃO.....	36
6.6 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	37
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	40
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Nas indústrias metalúrgicas materiais mais leves e mais resistentes interferem diretamente na facilidade de produção de peças, economia de energia de fabricação e maior qualidade do produto final, por isso faz necessária a busca contínua de novos materiais, que sejam capazes de apresentar alta qualidade metalúrgica, como é o caso dos aços ARBL - Alta Resistência e Baixa Liga (SCHONS, 2015). Um dos aços ARBL é o aço DOMEX 700, que possui sua alta resistência devido a elementos de liga e sua microestrutura composta de grãos finos de ferrita (COSTA, 2012).

Esses materiais precisam ainda conciliar custo e benefício para que sejam mais viáveis que os comumente utilizados. Pensando na redução de custos, é importante que o material tenha sua vida útil prolongada. Para isso faz-se uso de tratamentos térmicos e/ou tratamentos superficiais, dependendo do problema que se queira amenizar. Contudo, a corrosão é um efeito que acontece inevitavelmente e de diversos modos, podendo ser: entre o meio e o material, entre materiais diferentes, entre grãos de um mesmo material, e até mesmo dentro do mesmo grão. Deste modo é indispensável que se busque minimizar seus efeitos.

A fim de potencializar a superfície de um aço ARBL, denominado DOMEX[®] 700, este trabalho estudou-se os efeitos da corrosão na superfície do substrato revestido com ferro/níquel /cromo e submetido ao meio corrosivo de cloreto de sódio 3,5%. Para a deposição do revestimento foi utilizada a técnica de plasma *magnetron sputtering*. Os efeitos de corrosão sobre a taxa de corrosão foram comparados para o metal base e revestido.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a taxa de corrosão do revestimento de ferro/níquel/cromo, depositado por plasma *magnetron sputtering*, sobre o aço DOMEX 700.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar amostras de aço DOMEX 700 para a deposição a plasma;
- Realizar as deposições do revestimento ferro/cromo/níquel;
- Caracterizar a microestrutura do metal base;
- Realizar os ensaios de corrosão em meio NaCl 3,5%;
- Avaliar os efeitos que a presença do revestimento promove na taxa de corrosão do material.

3 JUSTIFICATIVA

Com os novos materiais surgindo no mercado é inevitável o estudo da resistência da corrosão destes materiais, para que sua aplicação seja ampliada. Para o estudo é interessante utilizar as técnicas e revestimentos existentes que retardam o processo de corrosão. Uma das técnicas de deposição bem versátil é a de plasma *magnetron sputtering* que confere ao revestimento espessuras de ordem nanométrica e alta taxa de deposição (MAZUR, 2014). É um revestimento com boas propriedades de oxirredução é de uma composição ferro/níquel/cromo.

Para a aplicação do revestimento e proteção contra corrosão escolheu-se o aço DOMEX 700 que é relativamente novo na indústria, e cada vez mais utilizado em uma ampla variedade de peças e componentes de estruturas críticas de sustentação de carga (como por exemplo, chassis de caminhões, guindastes e máquinas de terraplenagem) (SSAB, 2018). É importante buscar meios para aumentar a resistência à corrosão deste aço. Dessa forma, escolheu-se este aço e a técnica e revestimento supracitado anteriormente, para avaliar a taxa de corrosão do material.

4 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção do trabalho serão explanados os fundamentos teóricos referentes ao material, tipo de revestimento, corrosão e técnicas de análise de corrosão.

4.1 AÇO DOMEX 700

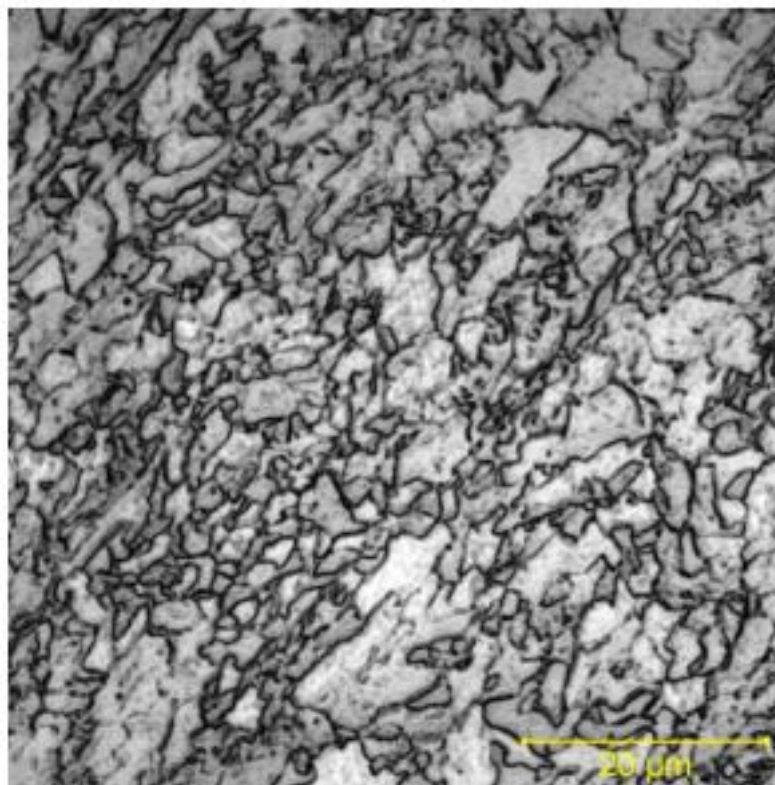
O aço DOMEX 700 é classificado como um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), o que significa que em sua composição os elementos de liga aparecem em uma porcentagem muito pequena (COSTA, 2012). Entretanto, apresenta uma resistência mecânica elevada quando comparado a aços carbono.

Os aços ARBL surgiram com a necessidade de materiais mais resistentes, porém com peso menor ou igual aos já utilizados. Deste modo, esse tipo de aço apresenta peso até 20% menor contraposto a aços carbono, com propriedades de resistência a tração entre 750 MPa a 900 MPa e limite de escoamento de 700 MPa (BORKO, HADZIMA e JACKOVA, 2017; SSAB, 2018).

Os elementos de liga proporcionam a alta resistência dos aços, pois formam uma solução sólida com a ferrita e a endurecem. Os elementos mais comuns no aço DOMEX 700 são: manganês, carbono, silício, enxofre, fósforo, alumínio, nióbio, vanádio e titânio (NOGUEIRA, 2013; SSAB, 2018).

Além dos elementos de liga, algumas técnicas usadas durante a fabricação dos aços ARBL também contribuem para o aumento da resistência mecânica. Como exemplo pode-se citar: refino do grão de ferrita, endurecimento por solução sólida, endurecimento pelo aumento da densidade de discordâncias, endurecimento por precipitação, laminação controlada e resfriamento controlado (COSTA, 2012). A Figura 1 mostra a microestrutura do aço DOMEX 700.

Figura 1 – Micrografia do aço DOMEX 700



Fonte: Borko, Hadzima, Jacková (2017)

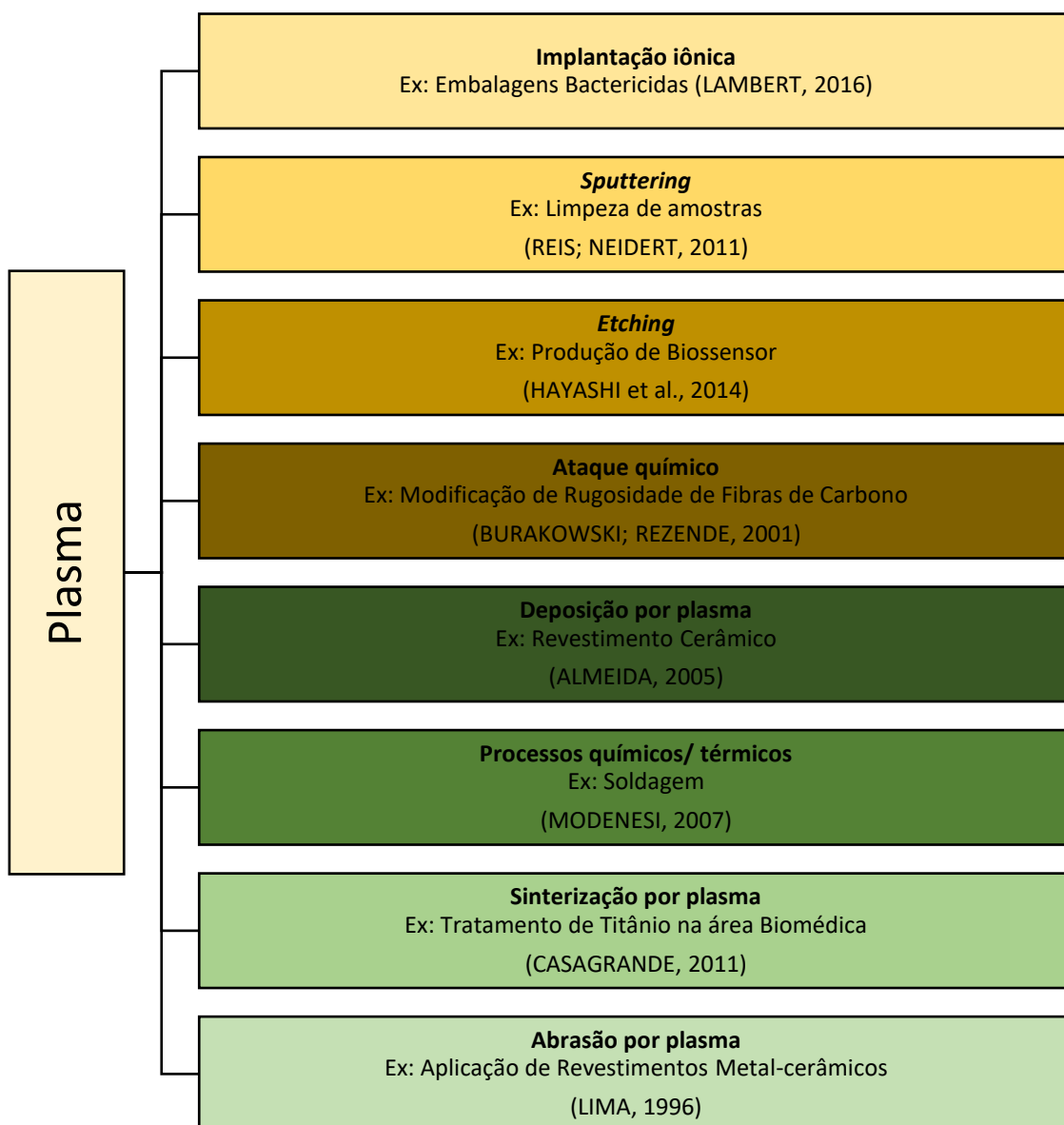
Como pode ser observado na Figura 1 a microestrutura do aço DOMEX 700 é basicamente composta por uma matriz de grãos finos de ferrita (BORKO, HADZIMA, JACKOVÁ, 2017).

4.2 DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS POR PLASMA

O termo Engenharia de Superfícies refere-se à preparação e modificação de superfícies de componentes para cumprirem funções específicas, sem causar grandes alterações em suas dimensões (FREIRE, 2012). Entre os métodos de preparação e modificação existem aqueles para proteger o componente da corrosão. Para se realizar a deposição de revestimentos, a técnica de plasma está inclusa.

O plasma pode ser a frio ou a quente e em cada tipo há uma gama de técnicas para modificação de superfícies. Na Figura 2 seguem as principais técnicas de deposição de revestimento a plasma e exemplos de aplicações, com a respectiva referência bibliográfica para um trabalho da literatura que aborda a técnica.

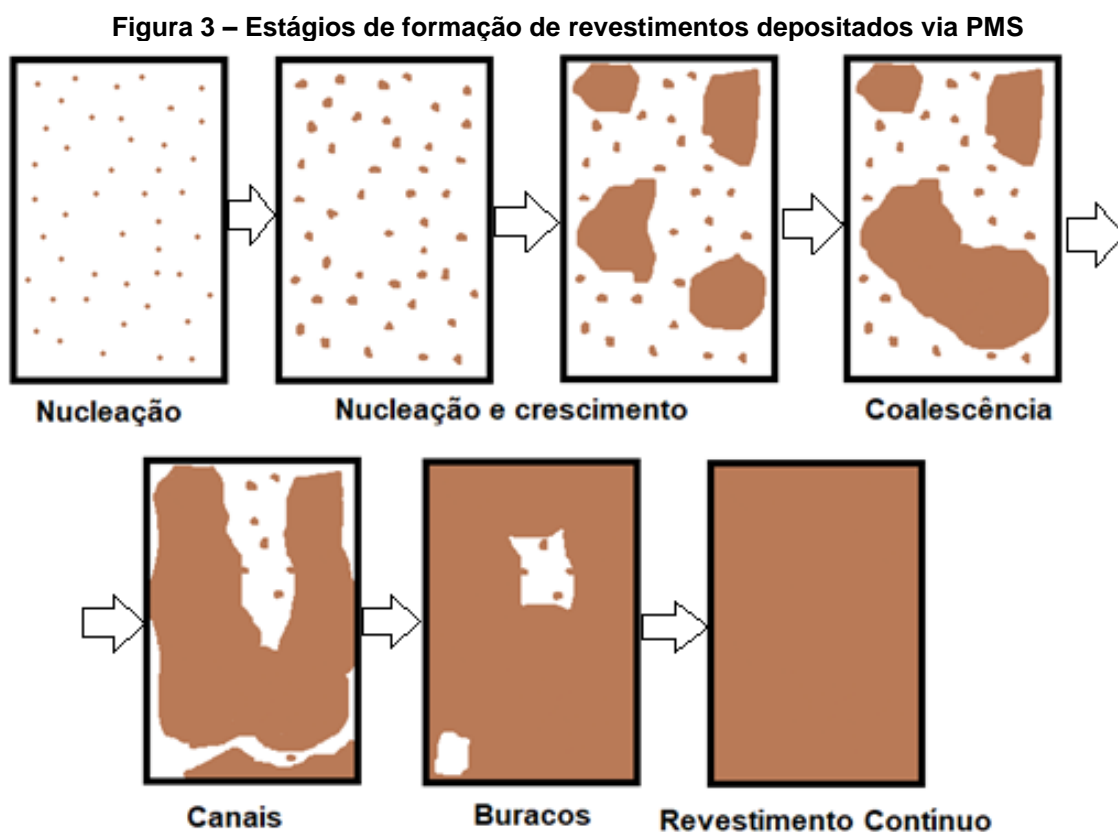
Figura 2 – Processos de deposição de revestimentos a plasma



Fonte: Autoria própria (2019)

Uma das características dos revestimentos depositados por Plasma *Magnetron Sputtering* (PMS) é que sua espessura é de ordem nanométrica. Nesta técnica a formação do revestimento inicia-se com o processo de nucleação, no qual átomos do material do revestimento interagem entre si formando aglomerados dispersos aleatoriamente sobre a superfície do metal. O núcleo cresce a medida que mais átomos são acrescentados, até o ponto que dois ou mais núcleos se encontram, dando início ao processo chamado de coalescência. O processo de crescimento continua e com isso, os espaços não preenchidos tomam formas de canais e posteriormente se assemelham a buracos, até que o crescimento preencha toda a

superfície formando um revestimento contínuo. O esquema do crescimento do revestimento está disposto na Figura 3, onde o processo se inicia com o desenho do canto esquerdo superior, seguindo as etapas indicadas pelas setas.

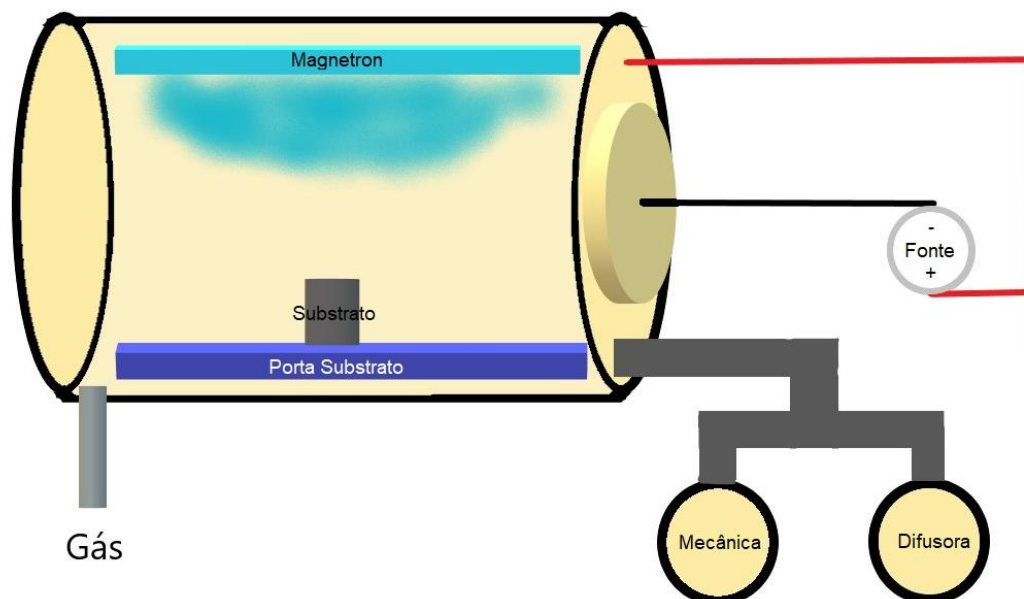


Fonte: Adaptado de Tatsch (2000).

Existem diversos tipos e modelos de reatores de plasma disponíveis no mercado. Neste trabalho foi utilizado o PMS com uma fonte de corrente contínua pulsada. Esse tipo de plasma possui elevada taxa de deposição de materiais para revestir uma superfície, por um processo denominado deposição física de vapor (PVD – *Physical Vapor Deposition*).

A Figura 4 mostra esquematicamente como é o reator de plasma e como é realizada a deposição por PMS.

Figura 4 – Desenho esquemático do reator PMS.



Fonte: Adaptado de Mazur (2014).

Para se realizar a deposição, no interior do reator é feito o vácuo a baixas pressões, da ordem de 10^{-5} bar pela ativação de uma bomba mecânica e na sequência, de uma bomba difusora. Depois, o gás de trabalho é injetado no reator e pela aplicação de uma diferença de potencial há sua ionização. O gás ionizado possui muita energia e as espécies (elétrons, átomos) energizadas conseguem arrancar átomos da superfície do alvo, chamado *magnetron*. O *magnetron* contém a composição química do material que se deseja depositar. Devido à diferença de cargas elétricas entre os átomos arrancados do *magnetron* e a superfície das amostras, ocorre sua deposição conforme as etapas apresentadas na Figura 3 (MAZUR, 2014).

4.3 CORROSÃO

A corrosão acontece quando um metal interage com um meio, podendo afetar características superficiais bem como propriedades mecânicas. A corrosão é definida como o ataque destrutivo e não intencional de um metal. Esse ataque é

eletroquímico e começa pela superfície (CALLISTER, 2016). Tal efeito impacta diretamente na vida útil das peças produzidas com o metal, reduzindo o tempo entre manutenções, o que acarreta em aumento de custos para uma empresa.

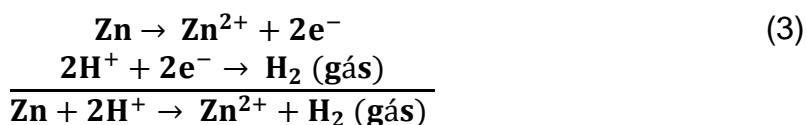
Nos metais, a corrosão acontece quando um metal cede elétrons para outro elemento, caracterizando uma reação de oxidação. O elemento (pode ser metálico ou não-metálico) então recebe os elétrons cedidos pelo metal, e assim é caracterizado a reação de redução. Um exemplo de reação de oxidação acontece quando o zinco perde dois elétrons de sua camada de valência, e pode ser representado como:



Os elétrons do zinco são transferidos para um meio com íons H^{+} , os quais são reduzidos, exemplificando uma reação de redução:

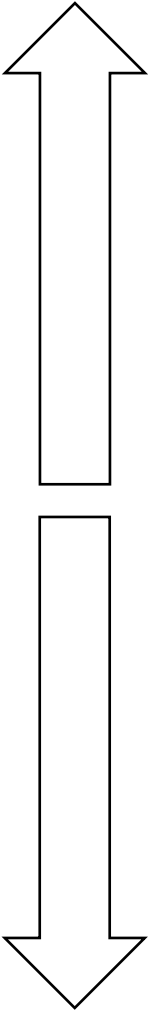


Com isso a reação total entre os elementos, ou reação de oxirredução, será:



Nem todos os metais possuem a mesma facilidade de perder elétrons. Alguns são mais propícios a cederem e outros, por serem mais ativos, a receberem. Usualmente as reações de oxidação são conhecidas como reações catódicas e as reações de redução são chamadas de reações anódicas. A facilidade de redução de um metal comparado a outro pode ser notada a partir da análise do potencial de redução: quanto maior o potencial mais propício o metal é a se reduzir. Tal fato pode ser observado pela disposição dos elementos na Tabela 1, onde as setas indicam se o metal é mais inerte ou mais ativo.

Tabela 1 – Série de potenciais de eletrodo padrão

	Reação do Eletrodo	Potencial de eletrodo padrão, V
 <p>Progressivamente mais inerte (Catódico)</p> <p>Progressivamente mais ativo (Anódico)</p>	$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	+1,420
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1,299
	$\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pt}$	~+1,2
	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	+0,800
	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,771
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH}^-)$	+0,441
	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,340
	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0,000
	$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,126
	$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,136
	$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,250
	$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$	-0,277
	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,403
	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,440
	$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,744
	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,7663
	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1,663
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,363	
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2,714	
$\text{K}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2,924	

Fonte: Adaptado de Callister (2016)

Dependendo das condições do ambiente no qual o metal está exposto a corrosão pode acontecer de forma mais acelerada. Alguns agentes aceleradores da corrosão incluem temperaturas elevadas, umidade contendo oxigênio, presença de compostos de enxofre e de cloreto de sódio.

4.3.1 Revestimento de ferro/níquel/cromo

Uma das alternativas para retardar os efeitos da corrosão é o tratamento superficial, como, por exemplo, a criação de um revestimento que evite o contato direto do metal com o meio. Esse revestimento pode ser formado por tintas, óxidos de metais, e ligas metálicas ou compósitos cerâmicos, por exemplo.

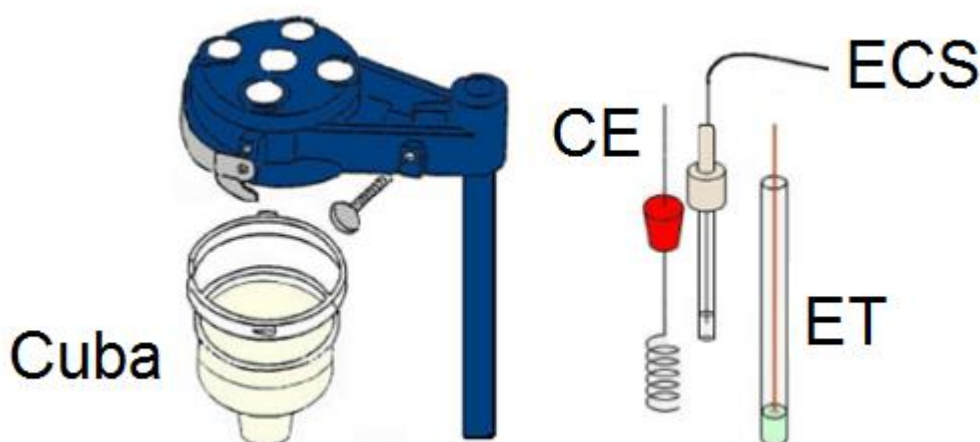
O revestimento utilizado para proteção do substrato deste trabalho é composto por ferro, níquel e cromo, respectivamente na ordem de porcentagem de participação do maior para menor. Observando-se a Tabela 1, os elementos Cr e Ni são mais ativos do que o ferro. Entretanto, os elementos níquel e cromo quando formam ligas metálicas com o ferro promovem aumento na resistência a corrosão devido a formação de uma película estável de óxidos na superfície, por uma reação com o oxigênio atmosférico.

4.4 CÉLULA ELETROQUÍMICA E TÉCNICAS DE ANÁLISE DE CORROSÃO

Existem diferentes técnicas eletroquímicas destinadas a análise da corrosão de materiais. Para realizar as medidas eletroquímicas, é necessário montar uma célula eletroquímica.

A célula eletroquímica é formada por três eletrodos: um eletrodo de trabalho (ET), um eletrodo de referência (ECS) e um contra-eletrodo (CE), além de uma cuba na qual o eletrólito é armazenado, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Célula eletroquímica composta pela cuba, contra-eletrodo, de referência e de trabalho



Fonte: Nascimento (2013)

O eletrodo de trabalho é definido com o material que se deseja estudar, logo se trata da amostra a ser analisada. O eletrodo de referência é ligado a solução por uma membrana ou ponte salina e através de reações químicas é capaz de medir o potencial elétrico padrão fornecendo um gradiente de potenciais. Geralmente o

eletrodo de referência é de hidrogênio, calomelano, prata-cloreto de prata e mercúrio-sulfato. Já o contra-eletródo é fundamental para que a conexão elétrica seja estabelecida, de modo que a corrente possa chegar ao eletrodo de trabalho. Comumente, os contra-eletródos são produzidos a partir de metais nobres, tal como platina ou ainda carbono-grafite que são materiais inertes que não influenciarão, ou influenciarão minimamente os resultados finais (NASCIMENTO, 2013; WOLYNEC, 2003).

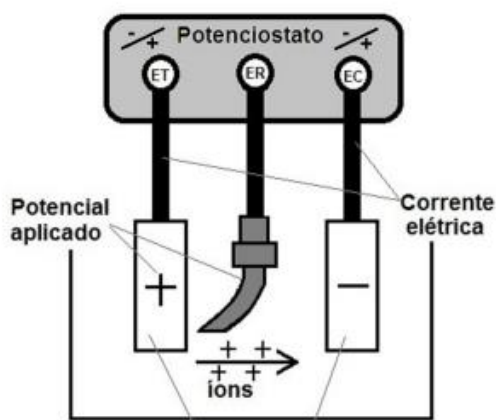
4.4.1 Potencial de corrosão

Quando um metal é imerso em uma solução eletrolítica é gerado uma interface entre o condutor metálico e o condutor iônico. Nessa interface ocorre distribuição de cargas, e conseqüentemente, existirá uma diferença de potencial entre o metal e a solução. Então, o metal passa a ter um potencial definido com potencial de corrosão (E_{corr}), que pode ser determinado pela medição em relação a um eletrodo de referência (SOUZA et al., 2009; WOLYNEC, 2003). A norma ASTM G59-97 (2009), especifica que após 55 minutos de imersão em uma solução eletrolítica pode ser definido o E_{corr} de um material. Entretanto, alguns materiais podem levar um tempo maior para estabilizar o E_{corr} devido às reações que ocorrem na interface metal/solução.

4.4.2 Micropolarização

Quando um material sai do seu estado de equilíbrio, por motivos externos, dentro de um ambiente corrosivo tal efeito pode ser denominado de polarização. No presente estudo a polarização foi necessária para impor potenciais de corrosão diferentes do potencial natural do substrato em questão (E_{corr}), para acelerar processos corrosivos e permitir o seu estudo em tempo reduzido. Para isso, é utilizado um aparelho chamado potenciostato, ilustrado na figura Figura 6. Utiliza-se então potenciais variados com velocidades de varredura constantes, varrendo uma faixa de potenciais, obtendo-se como resposta uma corrente elétrica.

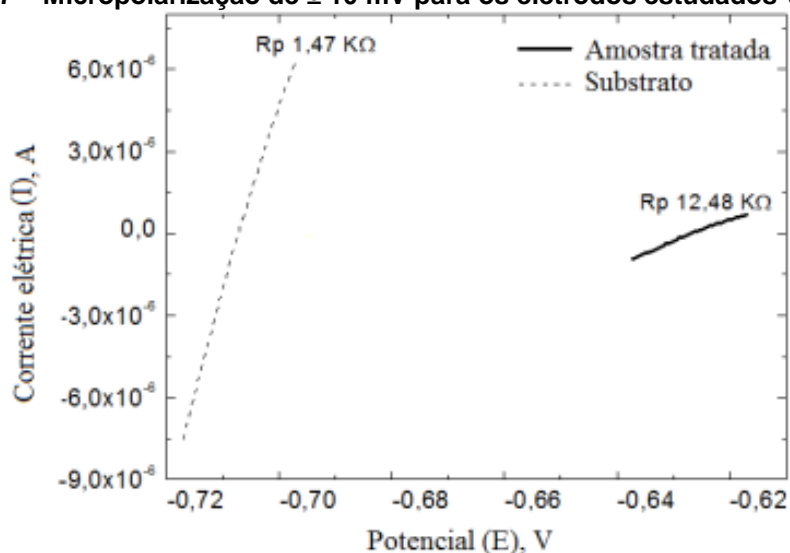
Figura 6 – Medição da curva de polarização



Fonte: Nascimento (2013)

A micropolarização consiste em criar uma variação de potencial em volta de potencial de corrosão (E_{corr}), com uma tensão variando entre ± 10 e ± 20 mV indicada pela norma ASTM. A resistência de polarização (R_p) é o inverso do coeficiente angular da reta de micropolarização medido em ohms (ASTM, 2009; TELEGINSKI, 2012). A Figura 7 exemplifica um gráfico de micropolarização.

Figura 7 – Micropolarização de ± 10 mV para os eletrodos estudados versus ECS



Fonte: Teleginski (2012)

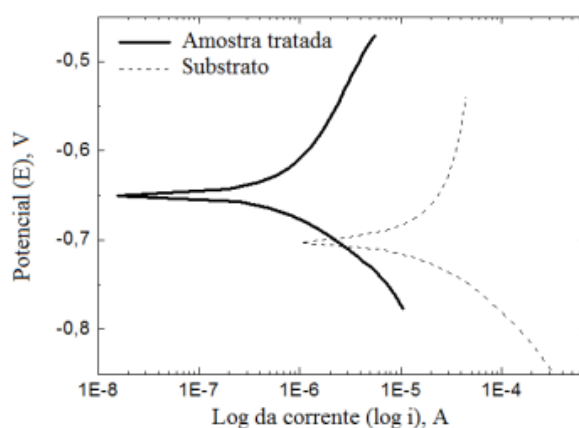
Conforme o gráfico, observa-se que quando as inclinações das retas aumentam consequentemente a resistência à polarização diminui, o que facilita a passagem de corrente, acelerando a corrosão (TELEGINSKI, 2012).

4.4.3 Macropolarização

A macropolarização é muito semelhante a micropolarização, o que as difere são os parâmetros de variação de potencial definidos pela norma. Na macropolarização a tensão varia entre ± 100 e ± 150 mV (ASTM G59-97, 2009).

A Figura 8 é um exemplo de gráfico produzido a partir do método de macropolarização, onde no eixo das abcissas, a corrente é colocada em escala logarítmica, enquanto que o potencial varrido é mostrado no eixo das coordenadas.

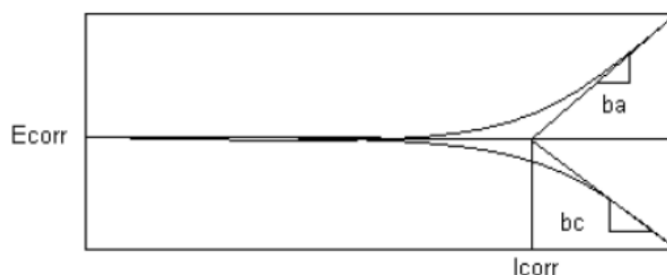
Figura 8 – Macropolarização de ± 100 mV para os eletrodos estudados versus ECS



Fonte: Teleginski, 2012

A partir desses gráficos é possível obter duas informações, utilizando a técnica de extrapolação de Tafel, que afirma que a reação anódica (Oxidação) e catódica (Redução) são realizadas simultaneamente: as inclinações de Tafel catódica (β_c) representado pela curva decrescente, e a anódica (β_a) calculado a partir da curva crescente.

Figura 9 – Determinação das inclinações de Tafel na macropolarização



Fonte: Adaptado de Wolynech (2003).

Com os dados de β_c e β_a é possível calcular a corrente de corrosão conforme a equação 4 (WOLYNEC, 2003), tendo a R_p como o inverso da curva obtida através da micropolarização em ohms (Ω) na micropolarização.

$$i_{\text{corr}} = \frac{|\beta_c|\beta_a}{2,303 \cdot R_p \cdot (|\beta_c| + \beta_a)} \quad (4)$$

Além disso, é possível calcular a taxa de corrosão através da equação 5 utilizando a corrente de corrosão obtida através da equação 4.

$$\text{taxa de corrosão} = \frac{PA \cdot i_{\text{corr}} \cdot t}{n \cdot \rho \cdot S \cdot F} \quad (5)$$

Onde:

- PA é o peso atômico do metal estudado (g/mol);
- n é o número de elétrons envolvidos na reação;
- F sendo a constante de Faraday (96487 Coulomb);
- S é a área do eletrodo (cm²);
- t o tempo de um ano, em segundos (31536000 s);
- ρ como a densidade do material (g/cm³).

5 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia de preparação e revestimento das amostras, bem como os procedimentos utilizados para análise da corrosão e de microestrutura.

5.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O substrato utilizado para a deposição foi o aço DOMEX 700, que foi adquirido em forma de chapa. Para reduzir o seu tamanho, um corte inicial foi realizado com guilhotina hidráulica, Clarck Machine, modelo TG306SA, no Laboratório de Conformação da UTFPR – GP. Depois, amostras menores foram cortadas nas dimensões 300 x 20 x 3 mm, utilizando cortadora metalográfica CM60, Teclago, no laboratório de Ensaios de Materiais da UTFPR-GP.

Figura 10 – (A) Amostras antes do processo de retificação, (B) retificadora utilizada, (C) amostra sendo retificada.



Fonte: Autoria própria (2018)

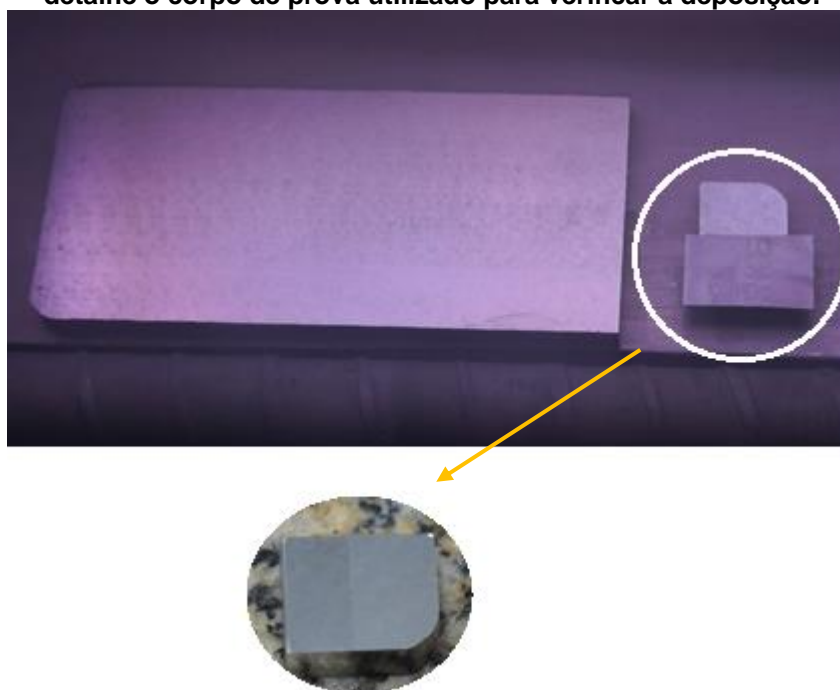
As amostras apresentavam carepa de fabricação e então, para removê-la foi usada a operação de retificação, empregando a retificadora Eurostec KGS, com passes de 0,5 mm até que a superfície estivesse visivelmente retificada, com aspecto brilhante, sem riscos ou imperfeições. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**A apresenta as amostras antes e depois de passarem pelo processo de retificação. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**B é mostrada uma fotografia da retificadora e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**C mostra a amostra sendo retificada, ainda dentro da retificadora, no Laboratório de Usinagem

da UTFPR-GP. Após o processo de retificação, as amostras foram limpas com água corrente e detergente.

5.2 DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO

Previamente a deposição do revestimento, as amostras foram limpas com álcool isopropílico. Após secagem natural, as amostras foram colocadas no sistema de plasma *magnetron sputtering*, disponibilizado pelo Laboratório de Plasma da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Na Figura 11 é mostrado o material durante o processo e também um corpo de prova utilizado para verificar a deposição do revestimento.

Figura 11 – Processo de deposição a plasma do revestimento de ferro/níquel/cromo. No detalhe o corpo de prova utilizado para verificar a deposição.



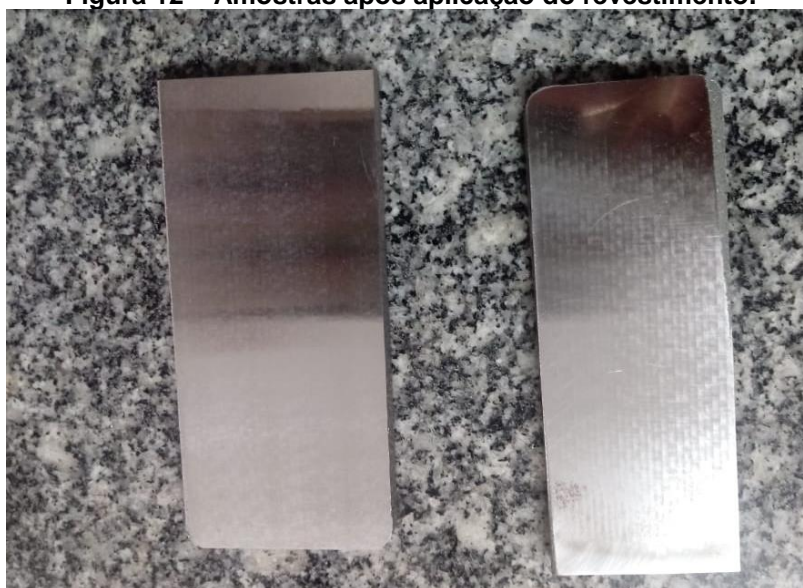
Fonte: Autoria própria (2018)

Uma parte do corpo foi coberta impedindo a deposição e a outra não. Após o processo é notável a diferença superficial entre as duas partes do corpo de prova, evidenciando que houve a deposição de um revestimento.

5.3 SISTEMA DE PLASMA MAGNETRON SPUTTERING

O equipamento de Plasma *magnetron sputtering* é formado por diversos sistemas de bombeamento de vácuo e câmara de deposição. Antes de começar o processo é necessário gerar um vácuo dentro da câmara. Para isso é utilizado o sistema de vácuo, que é composto por uma bomba mecânica e uma bomba difusora, ambas ligadas em série. Inicialmente se criou um vácuo com a utilização da bomba mecânica até que a pressão ficasse em torno de 10^{-2} mbar. Então a pressão de vácuo foi regulada com o auxílio da bomba difusora para atingir $7,4 \times 10^{-5}$ mbar. Depois disso inseriu-se o gás de trabalho argônio (99,9% de pureza), obtendo-se a pressão de trabalho de 3×10^{-3} mbar. Foram utilizados os parâmetros de tensão de pico 613 V, corrente de 0,98 A, ciclo de trabalho 50 e potência de 0,60 kW para a deposição do revestimento Fe/Ni/Cr, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 – Amostras após aplicação do revestimento.



Fonte: Autoria própria (2018)

Na Figura 12 são mostradas as amostras de aço DOMEX 700 com o revestimento aplicado.

5.4 ANÁLISE DE CORROSÃO

Os ensaios de corrosão foram realizados no Laboratório de Caracterização Eletroquímica da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). Os ensaios foram feitos em solução aerada de NaCl 3,5%, em temperatura ambiente ($25 \pm 0,5$ °C). Eletrodos de trabalho consistem das amostras de aço DOMEX 700 com e sem o revestimento Fe/Ni/Cr, para efeitos de comparação. Como contra-eletrodo (CE) utilizou-se platina e eletrodo de referência calomelano saturado (ECS), com capilar de Luggin os quais foram utilizados para formar a célula eletroquímica. A área exposta da amostra foi fixada em $0,785$ cm², pois a sua delimitação era feita por um furo de 1 cm de diâmetro vedado com um anel de borracha do tipo o-ring. Na Figura 13 é possível visualizar uma fotografia da célula utilizada para as análises.

Figura 13 – Fotografia da célula eletroquímica, UNICENTRO.



Fonte: Autoria própria (2018)

Foram realizados ensaios para medição de potencial de corrosão (E_{corr}), micro e macropolarizações. O parâmetro E_{corr} foi medido conforme norma (ASTM G59-97, 2009), a qual define E_{corr} como o valor do potencial após 55 minutos de imersão na solução. A micro e a macropolarização foram realizadas com uma tensão entre ± 10 mV e ± 100 mV, respectivamente, em torno do E_{corr} . Em função dos dados obtidos com esses ensaios, foram calculadas as taxas de corrosão das amostras com e sem o revestimento.

5.5 ANÁLISES DE MICROSCOPIA ÓPTICA

Com o auxílio do microscópio óptico (Figura 14), marca OLYMPUS BX51, com câmera digital OLYMPUS UC30, foram feitas micrografias das regiões do material que tiveram contato com o meio corrosivo durante o experimento.

Figura 14 – Microscópio óptico, UTFPR-GP.



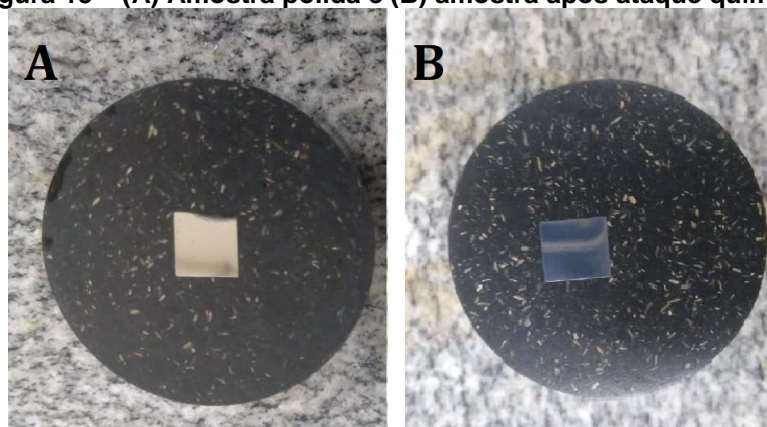
Fonte: Autoria própria (2018)

Além disso, análises do metal base foram realizadas, e para revelar a microestrutura do aço, as amostras foram embutidas em uma embutidora da marca TECLAGO modelo EM30D. Utilizou-se baquelite TECLAGO em pó e desmoldante no processo, com uma pressão de 100 bar a uma temperatura máxima de 169°C.

Após o embutimento, foi realizado lixamento com as lixas de granulometria 400, 600 e 1200 mesh # e polimento utilizando a politriz metalográfica PLO2E. O polimento foi feito com alumina 1 μm . O ataque químico foi realizado com Nital 3%

(ROHDE, 2010). O tempo de ataque foi definido por tentativas e posteriormente fixado em 221 segundos, seguido de lavagem em água corrente e secagem com soprador térmico. A Figura 15A mostra a amostra embutida e polida e na Figura 15B a amostra após ataque químico.

Figura 15 – (A) Amostra polida e (B) amostra após ataque químico



Fonte: Autoria própria (2018)

Todos os equipamentos para a análise de microestrutura foram disponibilizados pelo Laboratório de Materiais da UTFPR-GP.

5.6 ANÁLISES DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Foram feitas análises da composição química dos elementos através da técnica de fluorescência de raios X, modelo OXFORD instruments, Laboratório de Caracterização Eletroquímica da UNICENTRO. A Figura 16 mostra uma fotografia do equipamento utilizado.

Figura 16 - Equipamento de fluorescência de raios X, OXFORD instruments.



Fonte: Braz (2018)

As análises foram realizadas nas amostras de metal base e metal com revestimento.

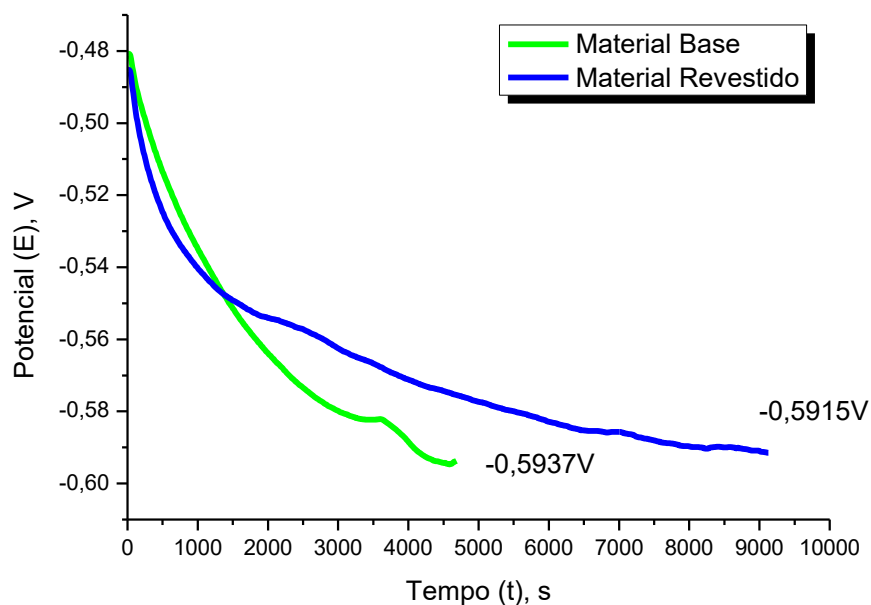
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos das caracterizações químicas, microestruturais e eletroquímicas. As análises foram realizadas no material com o revestimento e sem.

6.1 POTENCIAL DE CORROSÃO

O potencial de corrosão (E_{corr}) foi medido enquanto o material se encontrava submerso na solução de NaCl (3,5%) e foi medido para o material base e material revestido, como é mostrado na Figura 17. A medida de E_{corr} do material base foi obtida após a estabilização do potencial, que levou 4684 segundos, e a do material revestido levou 9127 segundos.

Figura 17 – Medida de potencial de corrosão E_{corr} em função do tempo para o material base e para o material revestido.



Fonte: Autoria própria (2019)

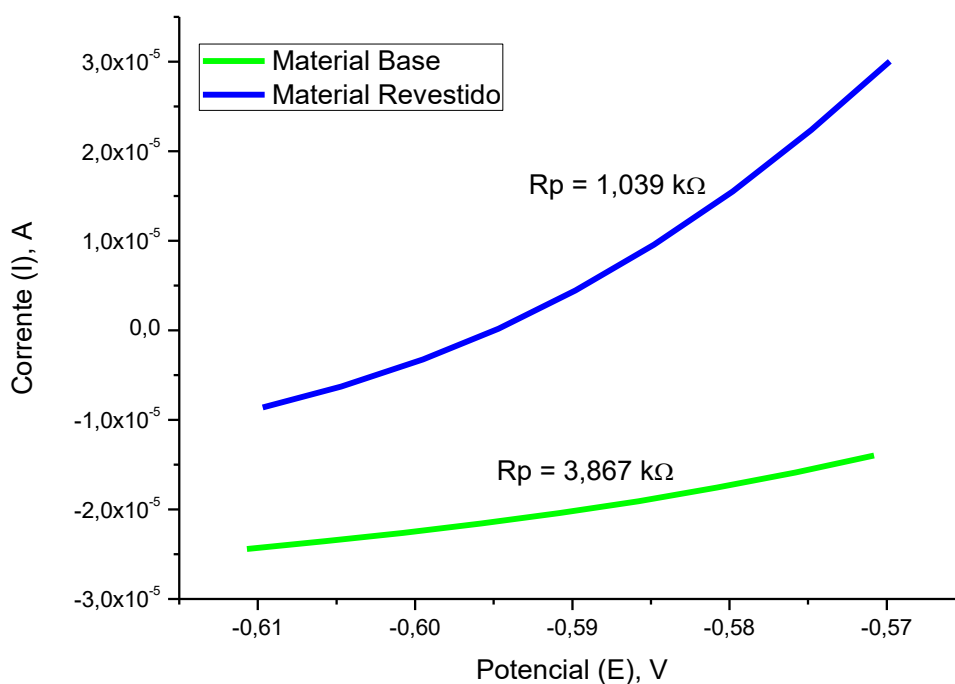
As medidas de potencial das duas amostras tiveram diferenças na ordem de 10^{-3} , sendo a medida para o material base de -0,5937 V e para o material revestido de -0,5915 V, como indicado na Figura 17. Isso indica que o revestimento não atuou

de forma a tornar mais positivo o E_{corr} , mas sim, que o processo de estabilização da superfície foi dificultado.

6.2 MICROPOLARIZAÇÃO

Os dados obtidos no ensaio de micropolarização, no qual foi aplicado um potencial de ± 10 mV em torno do E_{corr} , são apresentados na forma de gráfico, conforme a Figura 18, tanto para o material base como para o material revestido.

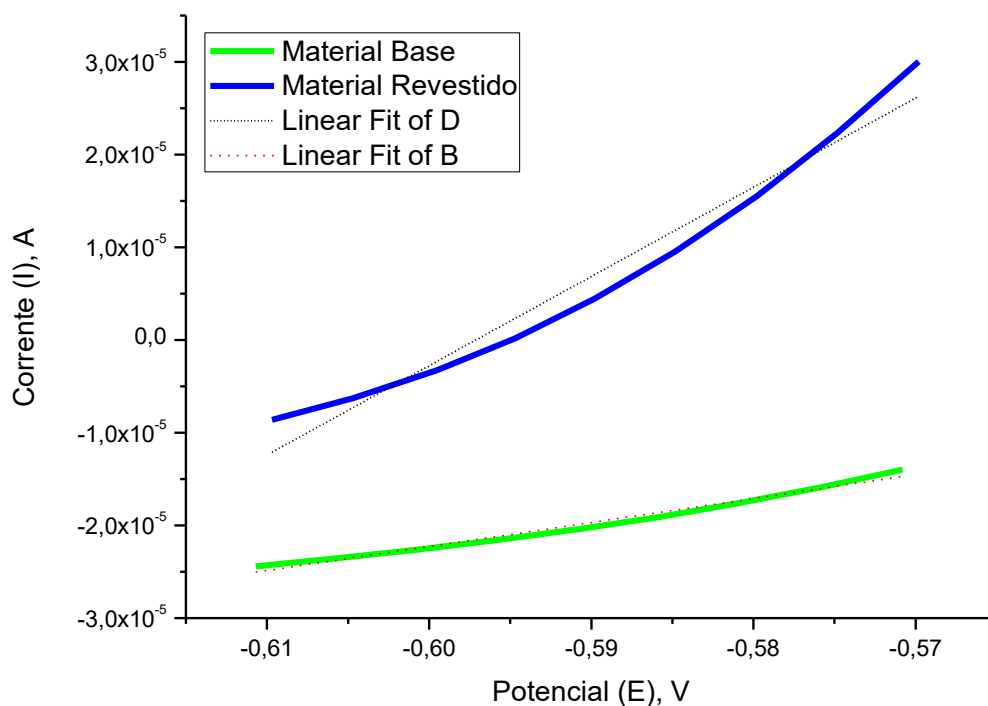
Figura 18 – Medida de micropolarização para o material base e para o material revestido.



Fonte: Autoria própria (2019)

Com o gráfico foi possível calcular a resistência de polarização (R_p). A R_p do substrato é maior do que a do material revestido, uma vez que a resistência de polarização é encontrada pelo inverso do coeficiente de inclinação do ajuste linear da curva de resultados para a micropolarização, como indicado na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico de micropolarização com ajuste linear indicado



Fonte: Autoria própria (2019)

Juntamente com o gráfico de ajuste linear foi gerado uma tabela que indica os valores das inclinações das retas, a equação utilizada para fazer o ajuste linear e seu erro envolvido. Esses valores estão disponíveis na Figura 20, sendo os valores para material revestido e material base, nessa ordem, de cima para baixo.

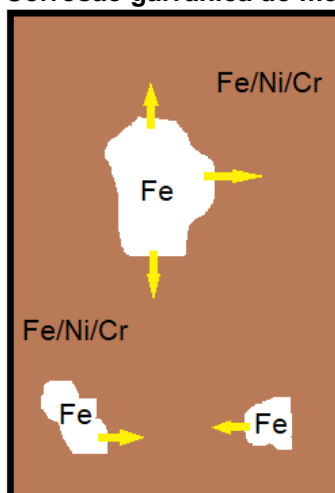
Figura 20 - Valores dos ajustes lineares, Valores para material revestido e material base de cima para baixo.

Equation	y = a + b*x		
Adj. R-Square	0,96236		
		Value	Standard Error
D	Intercept	5,74619E-4	3,95923E-5
		9,62314E-4	6,712E-5
Equation	y = a + b*x		
Adj. R-Square	0,98036		
		Value	Standard Error
B	B	1,3286E-4	7,63536E-6
		2,58559E-4	1,29212E-5

Fonte: Autoria própria (2019)

Esse resultado pode ser atribuído a possibilidade de que regiões do metal não tenham sido completamente preenchidas com o revestimento, devido ao modo como ele é formado: nucleação, crescimento, coalescência e homogeneização do revestimento (TATSCH, 2000). A existência de regiões com exposição do metal base devido a não homogeneização gera diferença de potencial entre o revestimento e o metal base, iniciando um processo de corrosão galvânica. Este processo está indicado na Figura 21, a qual exemplifica a situação em que o revestimento possivelmente foi formado, mostrando, ainda, o fluxo de elétrons saindo do metal base (representado pelo elemento que sofre a corrosão, no caso o ferro) em direção ao revestimento, que se tornou mais nobre devido ao cromo e níquel depositados.

Figura 21 – Corrosão galvânica do metal revestido



Fonte: Autoria própria (2019)

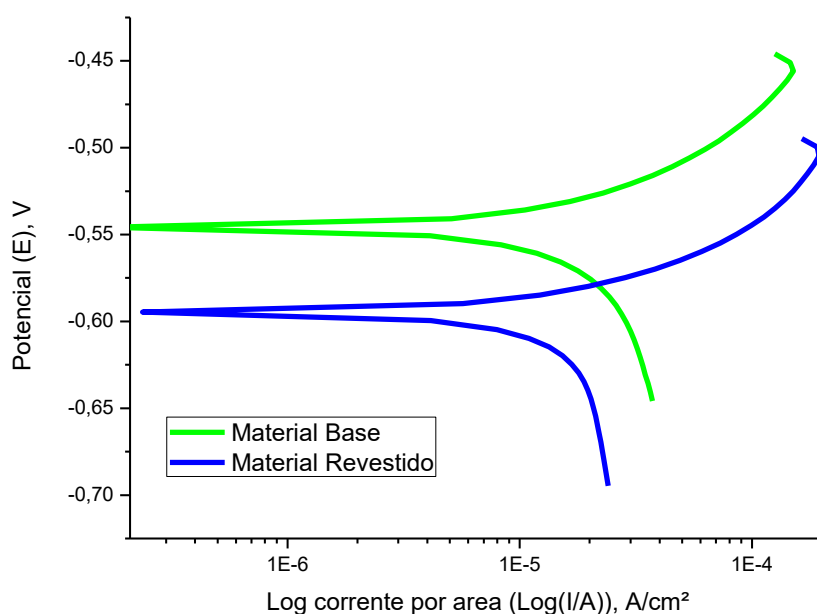
Esse fluxo de elétrons gera uma célula galvânica localizada que, por sua vez, diminui a resistência à corrosão do metal. Dessa forma, a célula galvânica facilita o processo de aprofundamento dos pites, observados na microestrutura da Figura 25.

6.3 MACROPOLARIZAÇÃO

Os dados obtidos com o ensaio de macropolarização são apresentados na forma de gráfico, conforme a Figura 22, no qual é comparado o resultado para o material com revestimento e sem.

Analisando o gráfico de macropolarização do metal base, observa-se que o potencial de corrosão (eixo y) foi deslocado para valores mais positivos, quando comparado ao primeiro valor apresentado no gráfico de potencial de corrosão (Figura 17). Tal fato pode estar atrelado ao crescimento da camada de óxidos gerados pela corrosão generalizada da superfície do metal, o que gerou certa estabilização no processo corrosivo.

Figura 22 – Medida de macropolarização para o material base e para o material revestido



Fonte: Autoria própria (2019)

Para uma reação eletroquímica sob controle de ativação, curvas de polarização exibem comportamento linear nos gráficos E_{corr} vs $\log(i)$, chamados comportamento de Tafel, β_c e β_a . Nesse ponto há semelhança nas curvas de macropolarização (metal base e metal revestido), o que é indício de que a energia requerida para as reações anódicas e catódicas, bem como a natureza das reações se mantiveram. Sendo assim, é possível dizer que o ferro oxidado no processo de corrosão do material que contém o revestimento é o ferro presente no material base.

Para o cálculo da taxa de corrosão foram usados os valores β_c e β_a , juntamente com os dados de resistência de polarização (R_p), utilizando as equações 4 e 5, nas quais obtém-se a corrente de corrosão e taxa de corrosão,

respectivamente. Os resultados dos ensaios eletroquímicos, bem como o resultado das equações estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados eletroquímicos das análises de corrosão

	E_{corr} (V)	R_p (k Ω)	β_c (V/dec)	β_a (V/dec)	I_{corr} (A/cm ²)	Taxa de corrosão (mm/ano)
Material Base	-0,5937	3,867	0,01669	0,01594	$9,156 \times 10^{-7}$	0,01365
Material Revestido	-0,5915	1,039	0,01831	0,01669	$3,649 \times 10^{-6}$	0,05441

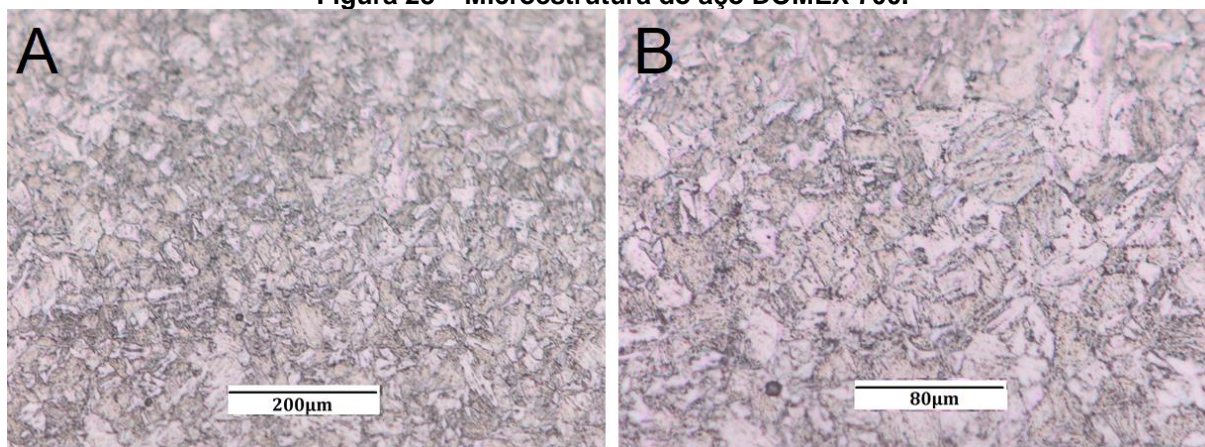
Fonte: Autoria Própria (2019)

Com o resultado do cálculo da taxa de corrosão mostrado na Tabela 2, observa-se que houve o aumento da taxa de corrosão para o material revestido, devido à redução de sua R_p e ainda o aumento da corrente de corrosão (I_{corr}). A oxidação do ferro presente no metal base foi acelerada devido à formação de uma célula galvânica entre o revestimento e o metal base exposto.

6.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Foi realizado o ensaio metalográfico no substrato para definir a microestrutura do aço DOMEX 700. A Figura 23 mostra o material base com duas ampliações diferentes.

Figura 23 – Microestrutura do aço DOMEX 700.



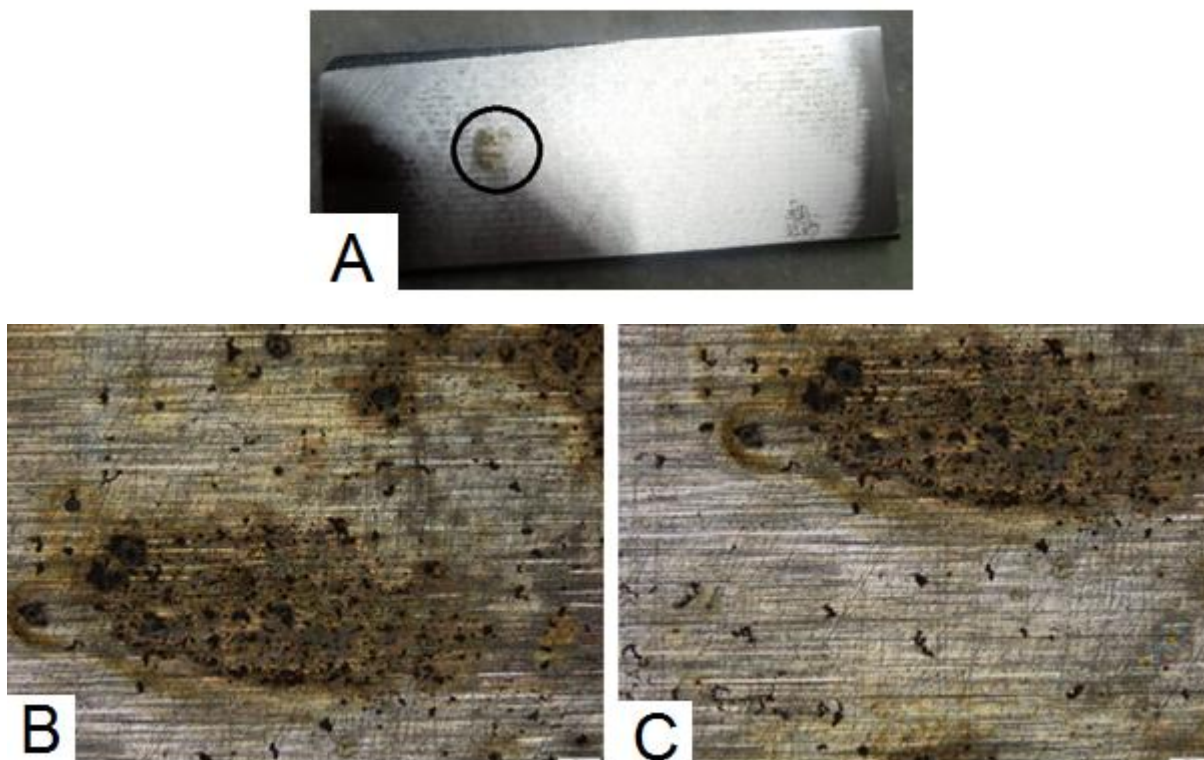
Fonte: Autoria própria (2019)

As regiões claras (ferrita) aparecem na maior parte, enquanto as regiões escuras são os contornos dos grãos de ferrita. Esse resultado é semelhante ao descrito na literatura (BORKO, HADZIMA, JACKOVÁ, 2017). Observa-se também que o tamanho dos grãos de ferrita é bastante reduzido, o que é importante para que o aço apresente elevada resistência mecânica.

6.5 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA APÓS CORROSÃO

Após passar pelas análises de corrosão, as amostras foram fotografadas e observadas com auxílio do microscópio óptico na região da superfície que esteve em contato com o agente corrosivo (NaCl 3,5%) durante o experimento. Para o metal base, a região observada é mostrada na Figura 24A, onde pode-se notar uma região amarelada, referente a corrosão generalizada da superfície, mostrando a formação de uma camada de óxidos resultante do processo corrosivo.

Figura 24 – (A) Fotografia do metal base após ensaios de corrosão. (B) e (C) regiões ampliadas no microscópio

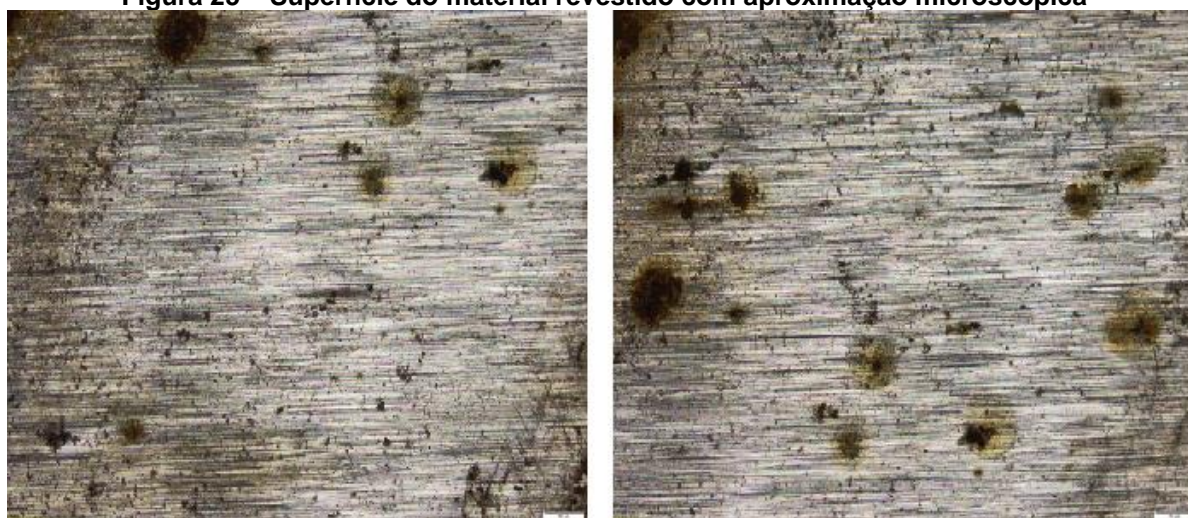


Fonte: Autoria própria (2018)

A Figura 24B e C mostram com mais detalhes a região corroída do metal base. Pequenos pontos pretos foram formados, indicando que houve o início da corrosão por pites, conforme a literatura prevê em caso de soluções contendo íons de cloreto (GENTIL, 2011).

O aspecto geral do metal com revestimento não mostra aspectos de corrosão, mas ao se ampliar a região, observam-se pontos mais profundos de corrosão, ou seja, corrosão por pites. Na Figura 25 é possível observar a superfície da amostra de material revestido.

Figura 25 – Superfície do material revestido com aproximação microscópica



Fonte: Autoria própria (2018)

Visualmente a superfície do material base apresenta mais corrosão quando comparada a superfície do material revestido. Isso se dá pela criação de uma película de óxidos formada durante a análise de corrosão, gerando corrosão superficial. Já o material revestido apresenta corrosão por pites mais profundos que aqueles observados no metal base.

6.6 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Foi realizada uma caracterização semi-quantitativa dos elementos químicos do aço DOMEX 700 com o revestimento de Fe/Ni/Cr e sem. A Tabela 3 mostra o resultado obtido de fluorescência de raios X do aço com revestimento e do material base.

Tabela 3 – Análise de elementos químicos do aço DOMEX 700, por fluorescência de raios X

	Mn	Fe	Nb
Material Base	1,06% ± 0,051	97,75% ± 0,069	0,02% ± 0,005
Revestido	1,04% ± 0,051	97,48% ± 0,072	0,03% ± 0,005

Fonte: Autoria própria (2018)

Observa-se pouca diferença na composição química, mesmo com a presença do revestimento. Isso se deve a espessura reduzida do revestimento, o qual é de ordem nanométrica (TATSCH, 2000), não sendo suficiente para gerar interações ou leitura no equipamento de análise.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a análise da taxa de corrosão do revestimento ferro/níquel/cromo, depositado via plasma *magnetron sputtering* (PMS) em aço DOMEX 700. Na análise metalográfica o aço DOMEX 700 apresentou microestrutura formada por grãos de ferrita finamente distribuídos. Em relação ao revestimento formado, que pode ser de ordem nanométrica, as análises de fluorescência de raios X não detectaram a presença dos elementos cromo e níquel devido a sua espessura reduzida, mas revelaram a presença de nióbio e manganês, que são elementos de liga do aço DOMEX 700.

Os ensaios de corrosão mostraram que a presença do revestimento de Fe/Ni/Cr não modificou o potencial de circuito aberto, mas a polarização mostrou que houve redução na resistência de polarização e aumento na corrente de corrosão, levando a uma taxa de corrosão maior para o material revestido de 0,05 mm/ano contra a taxa de 0,01 mm/ano do metal base.

Como a natureza das reações de oxirredução foi mantida, conclui-se que o ferro presente no metal base oxidou-se em ambos os casos, indicando que o revestimento não foi formado de maneira homogênea, mas possivelmente, apresenta falhas de deposição. Essa situação gerou a formação de célula galvânica entre revestimento e metal base, o que levou ao aumento na taxa de corrosão e formação de pites mais profundos, em comparação ao metal base. Com isso conclui-se que é possível fazer deposição a plasma de revestimento Fe/Ni/Cr, entretanto é necessário que o revestimento cubra completamente a superfície do metal base.

Entretanto, avarias no revestimento poderiam causar o mesmo efeito e dessa forma, o revestimento depositado a plasma para proteção de corrosão deve ser homogêneo e além disso, cuidados no processo de deposição e manuseio das peças após a deposição são necessários para que o revestimento seja funcional no aumento da resistência à corrosão.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aumentar a espessura do revestimento Fe/Ni/Cr;
- Fazer análise de microscopia eletrônica de emissão de campo (FEG) para conseguir observar a microestrutura do revestimento formado e confirmar se houveram avarias ou defeitos de deposição nos revestimentos estudados;
- Realizar novos ensaios de corrosão em revestimentos mais espessos, inclusive com outras soluções e reagentes, como H_2SO_4 , por exemplo;
- Utilizar as técnicas de Raman e infravermelho para caracterização do revestimento.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. S. de. **Estudo De Revestimentos Cerâmicos Sobre Substrato Metálico, Obtidos Por Deposição Física De Vapores Por Feixe De Elétrons Para Aplicação Como Barreira Térmica.** São José dos Campos: INPE, p. 175-177, 2005.

ASTM G59-97 (2009). **Standard Test Method For Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements,** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

BORKO, K.; HADZIMA, B.; JACKOVÁ, M. N. **Corrosion Resistance Of Domex 700 Steel After Combined Surface Treatment In Chloride Environment.** Procedia engineering, v. 192, p. 58-63, 2017.

BRAZ, W. C. **Estudo da resistência à corrosão da liga automobilística DP600 devido a soldagem a laser.** 2018. 43 f. TCC – (graduação) – Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, 2018. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir00661a&AN=roca.1.10205&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>>. Acesso em: 7 maio. 2019.

BURAKOWSKI, L.; REZENDE, M. C. **Modificação Da Rugosidade De Fibras De Carbono Por Método Químico Para Aplicação Em Compósitos Poliméricos.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 11, n. 2, 2001.

CALLISTER, Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 9ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016, 704 p.

CASAGRANDE, J. **Estudo Das Propriedades Mecânicas Da Liga Ti-Nb Sinterizada Para Aplicação Na Área Biomédica.** 2011.

COSTA, V. M. **Caracterização Mecânica E Metalúrgica De Juntas Dissimilares De Aços De Alta Resistência E Baixa Liga**. 2012. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola de Metalurgia, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

REIS, R. F.; NEIDERT, R. **Influência da limpeza prévia por sputtering na nitretação por plasma de aços inoxidáveis**. *Matéria (Rio J.)*, Rio de Janeiro, v. 16, n. 2, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v16n2/04.pdf>>.

FREIRE Jr, F. L. (organizador). **Engenharia De Superfícies** [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: Epistemia Comunicação, 2012. 71p., recurso digital.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 376p.

HAYASHI, R. K. **Desenvolvimento De Um Eletrodo Aplicado Ao Biosensor Do Nariz Eletrônico Via Técnica De Plasma**. In: Embrapa Instrumentação-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2014, São Carlos, SP Anais do SIAGRO: ciência, inovação e mercado 2014. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 133-136. Editores: Carlos Manoel Pedro Vaz, Débora Marcondes Bastos Pereira Milori, Silvio Crestana.

LAMBERT, C. S. **Processos Físicos De Tratamento De Superfícies Usando Tecnologia De Vácuo E Plasma (Nanotecnologia) Na Área Médica E Em Diversos Ramos Da Indústria**. Sínteses: *Revista Eletrônica do SIMTEC*, n. 2, p. 205-205, 2016.

LIMA, C. R. C. **Proposta de um novo método de aplicação de revestimentos metal-cerâmicos por aspersão térmica a plasma**. 1996. 183f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em:

<<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/265283>>. Acesso em: 10 de junho. 2018.

MAZUR, M. M. **Desenvolvimento de filmes hidrofóbicos por plasma CC pulsado para isoladores elétricos de porcelana**. 2014. 88 f. Dissertação de Mestrado, Ciências e Eng. De Materiais. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2014.

MODENESI, P. J. **Introdução À Física Do Arco Elétrico E Sua Aplicação Na Soldagem Dos Metais**. Belo Horizonte, 2007.

NASCIMENTO, C. L. **Diagnóstico De Corrosividade Em Eletrodo De Aterramento Elétrico Cobreado**. 2013. 116 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná., Curitiba, 2013.

NOGUEIRA, R. C. **Caracterização Mecânica E Análise Microestrutural Com A Utilização Da Técnica De Tríplex Ataque Do Aço Multifásico AISI 4350**. 2013. 136 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013. Cap. 2.

ROHDE, R. A. **Metalografia Preparação De Amostras**. Laboratório de ensaios mecânicos. Universidade Regional Integrada do alto Uruguai e Missões, 3ª Edição, Rio Grande do Sul, 2010.

SCHONS, M. R. **Estudo Da Distorção Na Soldagem Mag Robotizada Em Chapas De Aço Domex 700 Com Espessura De 6,35mm**. 2015. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Fabor - Faculdade Horizontina, Horizontina, 2015.

SOUZA, A. R.; MOTA, D. P.; PAULA, S. R.; AGOSTINHO, S. M. L.; SILVA, M. M.P. **Medidas De Potencial De Circuito Aberto: Um Experimento Para O Ensaio De Eletroquímica**. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, v. 32, 2009.

SSAB. **Strenx 700 MC**. 2018. Disponível em: <<https://www.ssab.com.br/products/brands/strenx/products/strenx-700-mc>>. Acesso em: 30 maio 2018.

TATSCH, P. J. **Deposição de Filmes Finos: V Oficina de Microeletrônica**. 2000. Disponível em: < <https://www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/download/cap11.pdf>>. Acesso em: 08 junho. 2019.

TELEGINSKI, V. **Resistência à corrosão e simulação numérica da temperatura e tensões induzidas na refusão superficial a laser da liga aerospacial Al-1,5% Fe**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Caracterização de Materiais) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2012.

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