Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA PROCESSOS METALÚRGICOS

ANÁLISE DE CORROSÃO EM TUBOS DE AÇO CARBONO COM REVESTIMENTO POLIMÉRICO

Nátali de Oliveira Martins da Silva

Pindamonhangaba - SP
2024

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

ANÁLISE DE CORROSÃO EM TUBOS DE AÇO CARBONO COM REVESTIMENTO POLIMÉRICO

Nátali de Oliveira Martins da Silva

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba para graduação no Curso Superior de Tecnologia em Processos Metalúrgicos

Orientador(a): Profª.Drª. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão

S586a Silva, Nátali de Oliveira Martins da.
Análise de corrosão em tubos de aço carbono com revestimento polimérico / Nátali de Oliveira Martins da Silva / FATEC Pindamonhangaba, 2024.
33f.; il.

Orientadora: Professora Dr.ª Ana Beatriz Abrahão Ramos Moreira
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2024

1. Aço. 2. Revestimento Polimérico. 3. Corrosão.4. Método potenciodinâmico. I. Silva, Nátali de Oliveira Martins da. II. Abrahão, Ana Beatriz Ramos Moreira. III. Título.

CDD 669

Sueli Camargo de Souza – Bibliotecária FATEC Pindamonhangaba – CRB/8 7788

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

ANÁLISE DE CORROSÃO EM TUBOS DE AÇO CARBONO COM REVESTIMENTO POLIMÉRICO

Nátali de Oliveira Martins da Silva

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba para graduação, no Curso Superior de Tecnologia em Processos Metalúrgicos.

Profª. Drª. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

Prof. MSc. Marcelo Bergamini Carvalho
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

Ricelmo de Oliveira Pena
Liebherr

Pindamonhangaba, 11 de dezembro de 2024.

DEDICATÓRIA

A ilustríssima Professora Ana Beatriz, que me acompanhou e me orientou desde a minha primeira graduação, com muita paciência e zelo pelo que faz. Aos meus pais Raquel e Roberto que sempre me apoiaram em tudo, me supriram e nunca me deixaram desistir. Aos meus amigos que fiz aqui e considero meus maiores presentes da FATEC, Magno, Pamela, Leandro e Bryan, estes que fizeram os meus dias de aula mais agradáveis e que vou ter o prazer de acompanhá-los até finalizarem o curso. Meus sinceros agradecimentos a instituição, que me proporcionou experiências valiosíssimas e que levarei para a vida.

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

SILVA, Nátali O. M. da. **Análise de Corrosão em Tubos de Aço Carbono com Revestimento Polimérico**. 2024. Trabalho de Graduação (Curso de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2024.

RESUMO

Os processos corrosivos estão presentes em todos os locais, como por exemplo a deterioração de automóveis, eletrodomésticos, estruturas metálicas e instalações industriais. Sendo a corrosão um processo espontâneo pode-se diminuir a velocidade das reações, como por exemplo utilizando -se a polarização e passivação, os quais associados aos processos de proteção proporcionam a utilização econômica e segura dos materiais metálicos. Dos processos de proteção anticorrosiva utilizados, o revestimento constitui uma das técnicas com maior relevância considerando os aspectos de viabilidade técnica e econômica. Os revestimentos poliméricos fornecem uma barreira (física e eletroquímica) entre a superfície de aço do tubo e o ambiente que provoca corrosão. Os defeitos nos revestimentos de tubulações são inevitáveis em todas as etapas do processo de fabricação, durante a instalação e nas operações de tratamento de superfície. Um defeito, conhecido tecnicamente como descontinuidade nos revestimentos, causa a exposição do metal ao ambiente circundante e, nesse momento pode ocorrer a corrosão eletroquímica. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi determinar qual o nível de resistência a corrosão apresenta dois revestimentos poliméricos em aço, aplicando-se técnica potenciodinâmica.

PALAVRAS-CHAVE: Aço; Revestimento Polimérico; Corrosão; Método potenciodinâmico.

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

SILVA, Nátali O. M. da. **Corrosion Analysis in Carbon Steel Tubes with Polymeric Coating**. 2024. Undergraduate Work (Metallurgical Processes Course). Pindamonhangaba Faculty of Technology. Pindamonhangaba. 2024.

ABSTRACT

The corrosive processes are present everywhere, such as the deterioration of automobiles, household appliances, metal structures and industrial facilities. As corrosion is a spontaneous process, the speed of reactions can be delayed, which is achieved, among other ways, by the phenomena of polarization and passivation, which associated with protection processes provide the economical and safe use of metallic materials. Of the anti-corrosion protection processes used, coating is one of the most relevant techniques considering aspects of technical and economic viability. Polymeric coatings provide a barrier (physical and electrochemical) between the steel surface of the pipe and the environment that causes corrosion. Defects in pipe coatings are inevitable at every stage of the manufacturing process, during installation and in surface treatment operations. A defect, technically known as discontinuity in the coatings, causes the metal to be exposed to the surrounding environment and, at this point, electrochemical corrosion can occur. In this sense, the objective of this study was to determine the level of corrosion resistance presented by two polymeric coatings on steel, applying the potentiodynamic technique.

KEYWORDS: Steel. Polymeric Coating. Corrosion. Potentiodynamic method.

Sumário

1 INTRODUÇÃO **12**
1.1. OBJETIVOS **12**
1.1.1 OBJETIVO GERAL **12**
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS **12**
1.2 JUSTIFICATIVA **13**
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **14**
2.1 CORROSÃO **14**
2.1.1 MEIOS CORROSIVOS **14**
2.1.1.1 CORROSÃO ATMOSFÉRICA **15**
2.1.1.2 CORROSÃO NO SOLO **15**
2.1.1.3 CORROSÃO EM ÁGUA DOCE **16**
2.1.1.4 CORROSÃO EM ÁGUA SALGADA **16**
2.2 MÉTODOS DE PROTEÇÃO A CORROSÃO **16**
2.3.1 REVESTIMENTOS EM TUBOS DE AÇO CARBONO **17**
2.3.2 SISTEMAS DE REVESTIMENTO ANTICORROSIVO **17**
2.3.3 REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS **18**
2.4 TÉCNICAS PARA ANÁLISE DE CORROSÃO **18**
2.4.1 CURVA DE POLARIZAÇÃO **18**
2.4.2 VELOCIDADE DE CORROSÃO **19**
2.4.3 ENSAIO DE IMPEDÂNCIA **20**
3 MATERIAIS E MÉTODOS **21**
3.1 MATERIAIS **21**
3.2 MÉTODOS **22**
3.2.1. PREPARO DE AMOSTRAS **22**
3.2.2. MICROSCOPIA **23**
3.3. POTENCIOMENTRIA **24**
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES **26**
4.1 MICROSCOPIA **26**
4.2. CURVA DE POLARIZAÇÃO E IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA **27**
4.3. MICROSCOPIA ÓTICA APÓS ENSAIO ELETROQUÍMICO **29**
5 CONCLUSÃO **31**
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA **32**

1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, as companhias que fazem uso de tubulações em aço carbono para transporte de seus segmentos como petróleo ou gás, procuram se atentar bastante com a resistência desses aços, esperando por uma maior durabilidade de seus equipamentos, para que possíveis retrabalhos não sejam recorrentes, visando a economia de suas empresas, bem como a preocupação com acidentes ou contaminação no ambiente, conforme aplicação dessas tubulações (GENTIL, 2011).

Os maiores problemas encontrados que causam a diminuição da vida útil desse tipo de veículo se dá pela corrosão. Para tanto aplica-se diversos tipos de revestimentos nos tubos, com a finalidade de proteger a superfície da degradação causada pela corrosão por conta do meio agressivo em que estão inseridos. Uma das maneiras que pode ser feito é pelo revestimento polimérico, podendo chegar a uma camada de até 5mm de espessura do polímero sobreposto na superfície do tubo (ARAÚJO, 2015).

Sendo a corrosão um grande problema para os aços, têm-se a necessidade de se utilizar métodos protetivos para a superfície dos materiais, ainda mais em equipamentos de alto valor aquisitivo e que podem causar certo prejuízo financeiro dentro de uma empresa (ROGÉRIO, A. H. et al, 2018).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a resistência a corrosão em tubos de aço carbono com revestimentos poliméricos, utilizando de ensaios laboratoriais eletroquímicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar as taxas de corrosão das quais o sistema sofre, com ou sem proteções superficiais;

Comparar as taxas estimadas por meio de ensaios laboratoriais;

Descrever sobre os resultados com base no referencial teórico.

1.2 JUSTIFICATIVA

Frequentemente se tem ocorrências dos problemas de corrosão em diversas áreas, como nas indústrias, nos meios de transporte, meios de comunicação, na medicina e em obras artísticas, causando perdas econômicas que afetam na funcionalidade dessas áreas e diminuem a vida útil delas. Algumas perdas que se deve levar em consideração são por paralisações acidentais, onde demanda tempo para reparo ou substituição de equipamentos, levando ao atraso de uma produção por exemplo, ou a perda de uma grande quantidade de produto contaminado com propriedades tóxicas e que já não serve mais para o fim que estava destinado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CORROSÃO

A corrosão, nada mais é que a deterioração na superfície de um material, sendo comum o metálico ou não metálico, com certas taxas de profundidade segundo sua resistência. Esse fenômeno acontece por interação química ou eletroquímica entre o meio e o material, podendo haver ou não a presença de esforço mecânico. Os prejuízos que a superfície do material apresenta podem ser tais como desgaste, variações químicas e modificações estruturais, levando a desclassificação do uso desse material. O processo espontâneo da corrosão compromete a vida útil dos materiais e seu desempenho, deixando de satisfazer a sua finalidade. Por isso a importância do estudo, pois o fenômeno está presente em ligas de estruturas metálicas, tanques de armazenamento de combustíveis e meios de transportes como aviões, trens e automóveis. Essas estruturas recebem um alto investimento para que aumente a sua durabilidade e resistência a corrosão, elevando até mesmo o tempo estimado de funcionamento, fazendo jus aos valores aplicados para beneficiamento da superfície, e reduzindo os riscos de ocorrência de acidentes que acarretem danos irreparáveis (GENTIL, 2011).

Os metais raramente são encontrados no estado puro, pois eles quase sempre estão em uma combinação com um ou mais elementos não metálicos. Os minérios são o estado oxidado do metal, e para torná-lo puro, em alguns casos é necessário certa aplicação de energia para redução. A corrosão se dispõe de forma bastante simplificada, como a tendência de o metal reverter-se ao estado original, de mais baixa energia. De uma visão termodinâmica, a tendência da diminuição de energia é o principal motivo a corrosão metálica. A corrosão atmosférica do aço carbono é um processo eletroquímico onde o metal reage com a atmosfera formando um óxido ou outro composto similar ao minério original. A configuração deste processo engloba três componentes essenciais: o anodo, o catodo e uma solução eletricamente condutora. O anodo (-) é o local de potencial negativo onde o metal é corroído, a solução eletricamente condutora é o meio corrosivo, e o catodo (+) é à parte da mesma superfície metálica que constitui o outro eletrodo com potencial positivo (TELLES, 2012).

2.1.1 Meios Corrosivos

A corrosão é admitida como uma forma de atividade química ou, mais precisamente eletroquímica. A velocidade do ataque na superfície e sua extensão dependem não só da natureza do meio em que se está inserido, mas está relacionado também ao tipo de metal ou liga. A seguir, estão discorridos os meios corrosivos mais comuns nos próximos tópicos (CHIAVERINI, 2008).

2.1.1.1 Corrosão Atmosférica

Os componentes que podemos dizer que contribuem para a corrosão atmosférica são a velocidade e direção dos ventos, temperatura, umidade, radiação, contaminação do ar e aerossóis marinhos (íons cloreto, Cl-, ou derivados de cloreto de sódio, NaCl) (ALBERTI, 2005; HELENE, 1993).

Em áreas civis os principais agentes da corrosão presentes na atmosfera são os óxidos sulfurosos gasosos oriundos de combustíveis fósseis de veículos, indústrias e, usinas termoelétricas a carvão mineral. Nas costas, as partículas de água salgada atuam como meio corrosivo, sendo transportadas pelo ar. Para prevenir a corrosão atmosférica, os processos mais econômicos incluem adição de pequenos teores de alguns elementos de liga e a pintura, aplicada em peças com superfície preparadas e bem limpas, protegidas com uma camada de recobrimento. A galvanização é empregada também como meio protetor teoricamente econômico (CHIAVERINI, 2008).

O processo de corrosão atmosférica do aço carbono consiste, no modo que os elétrons fluem dentro do metal e íons fluem no eletrólito superficial (ARAÚJO, 2015).

2.1.1.2 Corrosão No Solo

Nos equipamentos enterrados, a corrosão ocorre por conta do baixo pH, correntes parasitas, baixa resistência e ação de bactérias. Contudo, também a água e o oxigênio são considerados fundamentais. Somente a resistividade do solo e a concentração de oxigênio podem ser consideravelmente críticos. Deste modo, a corrosão dada por aeração diferencial pode acelerar a velocidade de corrosão. Esse tipo de diferença de potencial pode ocorrer, por exemplo, quando um duto atravessa dois solos diferentes pela permeabilidade ao oxigênio, iniciando-se uma corrente galvânica da superfície dos dutos com menor aeração (anódica), por meio do solo, em direção à superfície com maior aeração. Os solos mais agressivos são os que possuindo grandes concentrações de sais solúveis, apresentam alta condutibilidade elétrica, ou seja, baixa resistividade. A ação de bactérias implica em mais de 50% das falhas que acontecem em metais enterrados. Para fim de acabar com a ação corrosiva em aço enterrado, a ação mais eficiente e economicamente viável, se dá pela aplicação catódica, em que se emprega corrente de retificadores e corrente de anodos, sacrificados isoladamente ou em conjunto com revestimentos orgânicos (CHIAVERINI, 2008).

O solo merece uma atenção ainda maior, por ser complexo, por suas variações na composição e propriedades, e pelo fato de interagir com o meio ambiente. A corrosividade do

solo é determinada como a disposição do ambiente para manifestar o processo de corrosivo (LOUREIRO, 2007).

2.1.1.3 Corrosão Em Água Doce

Os materiais metálicos, quando em contato com água, sofrem o processo de corrosão; o que acarreta isso são: pH, temperatura, sais dissolvidos, gases dissolvidos, matéria orgânica, materiais sólidos suspensos e microrganismos presentes. Alguns fatores agravantes de ação corrosiva, aparecem em águas naturais, em forma de poluentes, agrotóxicos, efluentes residenciais e industriais (LAQUE, 1975).

2.1.1.4 Corrosão Em Água Salgada

A água salgada, nada mais é do que uma solução homogênea, com principalmente cloretos de sódio e magnésio. Esses são os agentes principais para a corrosividade desse meio, sabendo que há muitos outros minerais encontrados dissolvidos na água. As medidas protetivas mais econômicas e eficientes para conter a corrosão em água salgada incluem aplicação de revestimentos orgânicos, seguido de proteção catódica e aplicação de inibidores (CHIAVERINI, 2008).

Para o meio salino estagnado, os valores das taxas de corrosão em aços carbono estão por volta de 70 mm/ano, sendo em condições de 5 e 10 anos de imersão. Para água salgada em agitação, mesmo que em baixa velocidade, as taxas de corrosão nos aços carbono são de aproximadamente 95 mm/ano (SILVA, 2010).

2.2 MÉTODOS DE PROTEÇÃO A CORROSÃO

A definição das medidas de prevenção deve começar no início, ou seja, na etapa de projeto, onde o principal objetivo do engenheiro é oferecer um projeto que se adeque a finalidade, fabricação e resistência mecânica. Muitas construções podem se localizar em regiões onde o ambiente é mais agressivo, alarmando a importância da proteção. Em questão de custo, o engenheiro deve considerar o fator da prevenção da corrosão em seu trabalho. De modo geral, é difícil proteger uma estrutura metálica através de tratamento de superfície se ela for projetada de forma inadequada considerando o fator corrosão. A forma mais eficiente e de custo baixo para evitar a corrosão é projetar corretamente a obra, desfavorecendo o processo

corrosivo. Uma construção economicamente efetiva, é aquela que apresenta menores custos ao longo de sua vida útil. Deve-se evitar a umidade residual, pois a corrosão ocorre na presença de umidade. Uma das tarefas mais importantes do engenheiro será a de garantir que a construção esteja com a sua superfície mais protegida possível da umidade (ARAÚJO, 2015).

2.3.1 Revestimentos Em Tubos De Aço Carbono

Atualmente as companhias de petróleo e gás se interessam na utilização de tubulação que apresentem bons resultados de resistência mecânica, sendo o valor de limite de escoamento maior ou igual a 69Mpa. São uma gama de propriedades exigidas para esses tubos, a depender do seu diâmetro, fluído que será transportado por conta do seu pH, abrasividade, condições em que o tubo será submetido no trabalho como pressão, temperatura, meio ambiente, custo para fazer a instalação e grau de dificuldade para fazer reparos. Em algumas situações são necessárias proteções contra corrosão na parte externa, sendo esse um fator consideravelmente importante. E os sistemas que são utilizados como revestimento são epóxi em pó, tripla camada com a configuração epóxi/adesivo/polietileno ou também epóxi/adesivo/polipropileno, podendo ser complementado por uma devida proteção catódica. Os revestimentos oferecem uma proteção por barreira chamada de barreira primária, pois quando o estudo do projeto de revestimento define como necessário para a segurança da instalação, se adiciona ainda um sistema protetivo secundário, o que é tecnicamente conhecido como “sistema de proteção catódica”, para que se tenha um reforço na proteção da integridade do duto, caso haja alguma falha no sistema primário (ROGÉRIO, A. H. et al, 2018).

2.3.2 Sistemas De Revestimento Anticorrosivo

O principal propósito na utilização dos revestimentos é isolar o tubo de material metálico do contato com o solo e água do mar, ou qualquer meio que seja agressivo para sua superfície, e apresentar alta resistência entre áreas anódicas e catódicas (REVESTIMENTOS EM TUBOS DE AÇO, 2011).

Para exercer tais funções, os revestimentos devem ter uma associação complexa de propriedades, entre as quais pode-se listar:

- Baixa permeabilidade a água e sais;
- Baixa permeabilidade ao oxigênio;
- Boa aderência ao substrato metálico;

- Adequada estabilidade a temperatura;
- Facilidade de aplicação;
- Apresentar processo economicamente viável;
- Resistência a biodegradação;
- Possibilidade de execução de reparos em áreas danificadas;
- Não apresentar toxidez, ser ecologicamente adequado e seguro na aplicação e manuseio;
- Ter estabilidade a radiação UV durante o período de estocagem;
- Ser resistente ao deslocamento catódico.

2.3.3 Revestimentos Poliméricos

O revestimento com Polietileno Extrudado em Duas Camadas, que desenvolvido nos anos 60 é atualmente utilizado como uma opção para revestimento de dutos com ⌀< 24” (609,6mm). Para diâmetros acima de 24” o que limita sua aplicação é o seu peso, o que torna o manuseio uma causa dos danos na camada superficial, ou seja, de revestimento e, em consequência, surge a possibilidade futura de falha por corrosão na tubulação naquele ponto. Embora a primeira camada seja formada por um mastique de asfalto ou betumem, esta camada pode ofertar parcialmente a proteção no caso de danos na segunda camada em polietileno. Os Sistemas de Tripla Camada com materiais termoplásticos do tipo Polietileno ou Polipropileno, são aplicados geralmente em tubos que apresentem espessura de 2,5 a 3,5mm, salvo alguns casos especiais, como na instalação em furo direcional para travessias de rios, chegando a espessuras de até 5mm. Neste processo, em primeiro momento o tubo recebe uma camada de FBE em espessura de 150 a 200 micrometros. Em seguida uma camada adesiva por extrusão com 150 a 200 micrometros imediatamente sobre o adesivo, e aplicando também por extrusão a camada final de polietileno ou PP. Os tubos com revestimentos em tripla camada com PE ou PP, recebem uma camada de material antiescorregamento antes da aplicação da camada de concreto (REVESTIMENTOS EM TUBOS DE AÇO, 2011).

2.4 TÉCNICAS PARA ANÁLISE DE CORROSÃO

2.4.1 Curva De Polarização

Em resumo, um eletrodo na configuração metal/solução, onde ocorre uma única reação, está orientada pela Equação 1 de Butler-Volmer a seguir:

Equação 1 - Butler Volmer

$$i = i_0 \left\{ \exp\left(\frac{\alpha z F \eta}{RT}\right) - \exp\left[\frac{-(1-\alpha) z F \eta}{RT}\right] \right\}$$

Está relacionado o sobrepotencial com a corrente resultante que traspassa o eletrodo. Assim, esta única reação pode ser discorrida por meio de curvas de polarização, que consiste em aplicar sobrepotenciais positivos ou negativos a partir do potencial de equilíbrio da amostra, e registrar como um tipo de resposta as correntes anódicas ou catódicas que atravessem a interface da amostra submetida. Quando o sobrepotencial aplicado for menor que 30 mV, a curva de polarização tende ao potencial de equilíbrio, ao passo que a densidade de corrente i tende a zero. Quando o sobrepotencial for elevado sendo superior a 30 mV, a curva de polarização apresentará comportamento linear do potencial em relação ao logaritmo. A equação de Butler-Volmer foi deduzida considerando apenas a polarização por ativação. As polarizações por concentração e por queda ôhmica, fazem com que, para altos sobrepotenciais aplicados, a resposta dada em corrente seja afastada do comportamento linear inicialmente esperado. Dessa forma, as equações de Tafel são validadas apenas em sistemas polarizados por ativação (WOLYNEC, 2008).

2.4.2 Velocidade De Corrosão

Em termos eletroquímicos, a velocidade do processo corrosivo é manifesta pela corrente de corrosão, representada pela perda de massa do material em função do tempo por sua unidade de área. Representando essa velocidade em equivalente-grama por unidade de área anódica (S) por segundo, o seu valor será obtido pela Equação 2 apresentada abaixo:

Equação 2

$$\frac{m}{EqSt} + \frac{1}{FS}$$

Sendo:

M = massa de metal oxidada (g);

Eq = equivalente eletroquímico (g);

S = área anódica (cm2);

I = intensidade de corrente (A);

F = constante de Faraday (96500 C);

tt = tempo (s).

Quando se tem uma pequena concentração do agente corrosivo, a curva catódica atinge o limite onde ocorre a difusão, e o transporte de reagentes passa a controlar a velocidade de corrosão no centro de ataque do metal, sendo a corrente de corrosão menor proporcionalmente a concentração. Se a condutividade do eletrólito é baixa, há uma queda ôhmica que também provoca diminuição no valor da corrente de corrosão. Portanto, quanto menor for a corrente da reação catódica ou anódica, maior será a resistividade a corrosão (TICIANELLI, et al 2005).

2.4.3 Ensaio De Impedância

A técnica empregada por Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) entrega uma visão com muitos detalhes das características elétricas da interface eletrodo/solução, e estas informações fortemente importantes na eletroquímica aplicada. O método de espectroscopia de impedância é uma ferramenta de indicação elétrica, que nos permite o estudo comportamental, de maneira geral, de um sistema quando muitos processos intercorrelacionados ocorrem em diferentes velocidades sendo ou não por uma composição da união de materiais diferentes (NOVA, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste estudo foram fornecidos pela empresa Tenaris Confab e consiste em amostras de tubos, em escala industrial, sendo elas amostras do aço bruto, ou seja, sem revestimento, e amostras com revestimento polimérico, sendo elas com revestimento de Polietileno e de Polipropileno. As Figuras 1, 2 e 3 a seguir apresentam as amostras fornecidas para estudo.

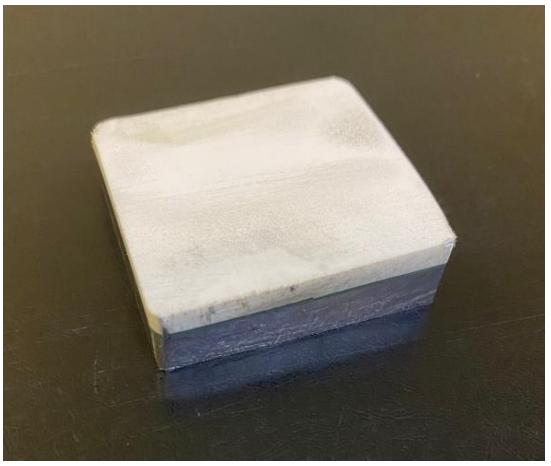
Figura 1 – Aço Bruto

Fonte: O autor, 2024

Figura 2 – Amostra com Revestimento de Polietileno

Fonte: O autor, 2024

Figura 3 – Amostra com Revestimento de Polipropileno



Fonte: O autor, 2024

A solução utilizada foi a de NaCl 3,6%, preparada no Laboratório Eletroquímico da Fatec como apresenta a Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Preparo de Solução

Fonte: O autor, 2024

3.2 MÉTODOS

3.2.1. Preparo de amostras

Para o preparo inicial das amostras, antes de submetê-las ao ensaio, utilizamos o Laboratório de Metalografia nas dispensações da FATEC (Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba), onde foi necessário sujeitar as amostras a algumas lixas para limpeza de sua superfície, buscando uma uniformidade e seguindo a sequência de lixamento conforme a norma abrasiva CAMI (*Coated Abrasives Manufactures Institute*), de 180mesh a 2000mesh, ilustrada na Figura 5. Neste processo, utilizou-se a lixadeira manual retangular, expressa na Figura 6 abaixo.

Figura 5 – Norma Abrasiva CAMI

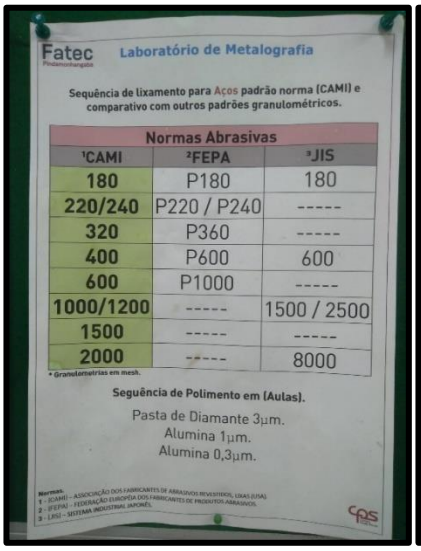
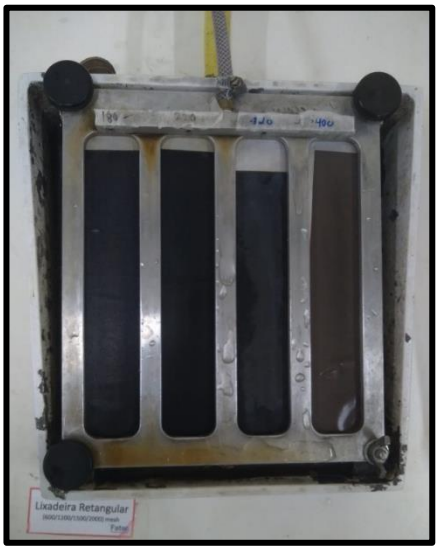


Figura 6 – Lixadeira Retangular

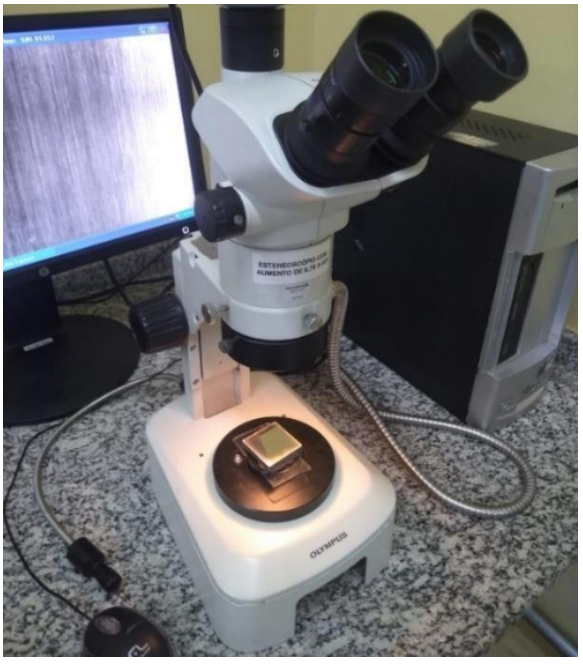


Fonte: O autor, 2024

3.2.2. Microscopia

Após a sequência de lixamento aumentando-se por etapas a granulometria das lixas, as amostras apresentaram uma superfície mais limpa e para registro das amostras de aço antes e depois do ensaio, foram dispostos pelo Laboratório os equipamentos Estereoscópio da marca OLYMPUS, como demonstra a Figura 7.

Figura 7 – Estereoscópio



Fonte: O autor, 2024

No Laboratório Eletroquímico de Corrosão (LEC), usufruímos de mais alguns equipamentos que estavam disponíveis, como a cuba ultrassônica da marca KITEST na Figura 8, que possui a finalidade de limpar as impurezas superficiais, onde a amostra é submersa dentro de um becker com água destilada, permanecendo cerca de 10 minutos no procedimento.

Figura 8 – Cuba Ultrassônica

Fonte: O autor, 2024

3.3. Potenciomentria

Após o preparo de amostra posicionou na célula plana como representa a Figura 9, para realizar o ensaio. Por fim a célula é instalada com seus eletrodos de contato e de referência diretamente no potenciostato, da marca AUTOLAB modelo PGSTAT 302N apresentado na Figura 10, que realiza o ensaio propriamente dito.

Figura 9 – Célula Plana

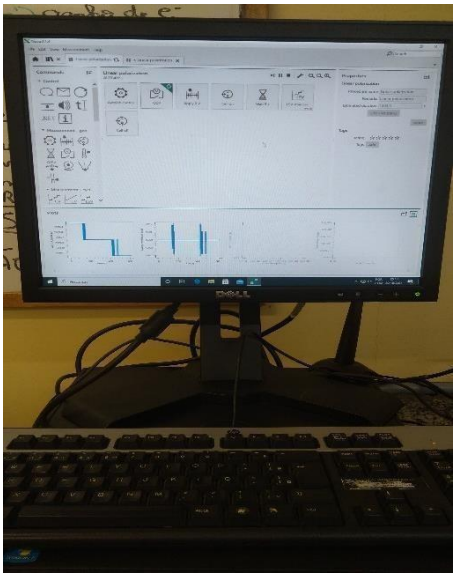
Fonte: O autor, 2024

Figura 10 – Potenciostato

Fonte: O autor, 2024

Os métodos utilizados para análise foram o de Polarização e o de Impedância por meio do equipamento potenciostato que basicamente ao aplicar energia elétrica na amostra, ela responde em forma de corrente, que assim gerou gráficos simultâneos por meio do software NOVA versão 2.1, como na Figura 11. A partir desses gráficos, foi possível absorver os dados e fazer as análises utilizando a lei de Tafel para dedução das taxas de corrosão em milímetros por ano.

Figura 11 – Software NOVA



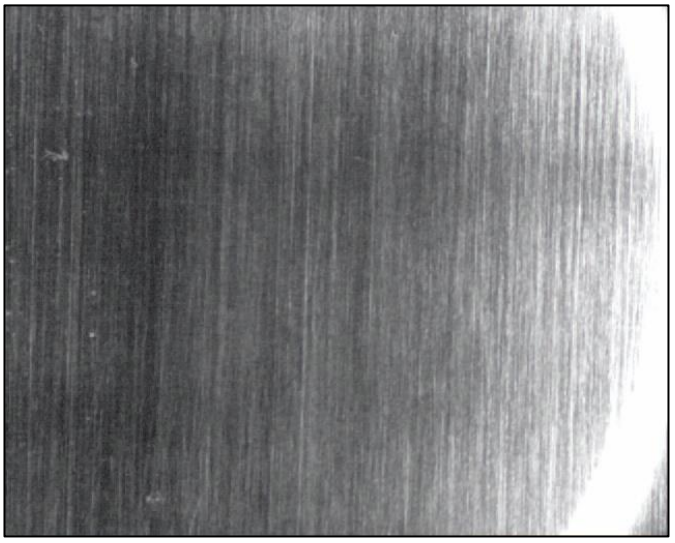
Fonte: O autor, 2024

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Microscopia

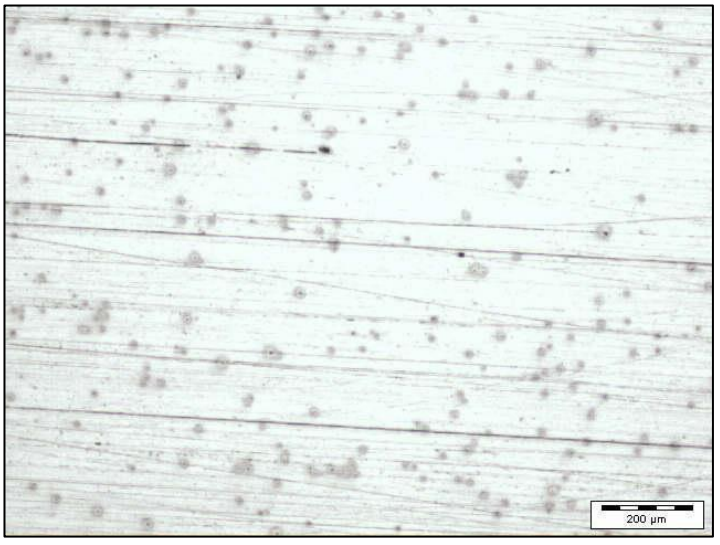
Foi realizada a microscopia óptica antes dos ensaios de corrosão para o aço, para verificação da morfologia e aspecto de fases, podendo se observar certa uniformidade da superfície antes do ataque corrosivo feito no ensaio potenciodinâmico. Como ilustrado pelas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Amostra de aço com 6,7x de ampliação



Fonte: O autor, 2024

Figura 13 – Amostra com 40x de ampliação



Fonte: O autor, 2024

4.2. CURVA DE POLARIZAÇÃO E IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA

As amostras de aço bruto, com revestimento de polipropileno e com revestimento de polietileno passaram pelo ensaio de polarização, que geralmente necessita de algumas horas em imersão para estabilização do potencial das amostras, e o tempo de imersão para cada uma foi registrado e estão descritos na Tabela 1.

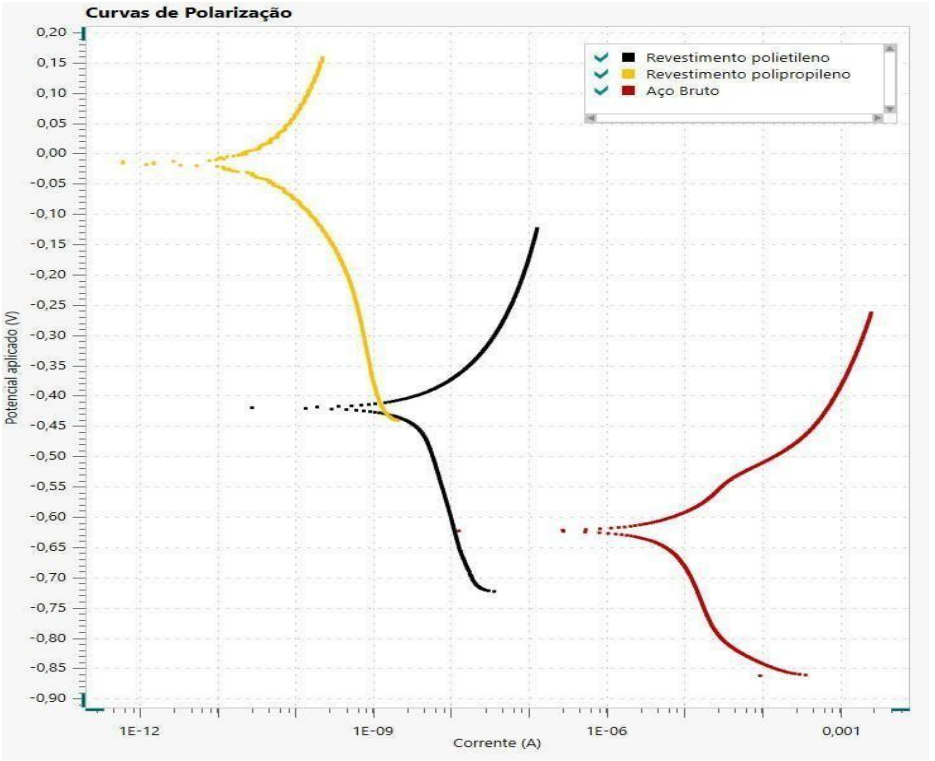
Tabela 1 – Tempo de Imersão para Estabilização

Amostra	Tempo de Imersão
Aço Bruto	08hrs
Revestimento Polietileno	08hrs
Revestimento Polipropileno	08hrs

Fonte: O autor, 2024

Com a aplicação de energia elétrica e medição da corrente no sistema montado com célula plana eletroquímica, pôde-se gerar as curvas de polarização (CP) simultaneamente. Estas curvas obtidas são ilustradas pela Figura 14 em que estão projetados os três ensaios realizados.

Figura 14 – Gráfico de Curvas de Polarização



Fonte: O autor, 2024

Em geral, potenciais mais positivos indicam um comportamento mais nobre do material, pois ele não necessita de muita energia para dar início ao processo corrosivo. Já em relação a corrente, quanto maior o valor maior é a taxa de corrosão e consequentemente menor a resistência. Com os valores de potencial e densidade de corrente foram obtidas pela lei de Tafel as taxas de corrosão para o aço com e sem revestimento polimérico. Conforme pode ser observado nas curvas, o tipo de revestimento aumenta o valor de resistência a corrosão.

Entre a amostra com revestimento de polipropileno, revestimento de polietileno e o material bruto, pode-se observar que há uma discrepância na resistividade a corrosão, como podemos observar na Tabela 2 a seguir, fazendo um comparativo entre eles.

Tabela 2 – Taxas de Corrosão das amostras estudadas

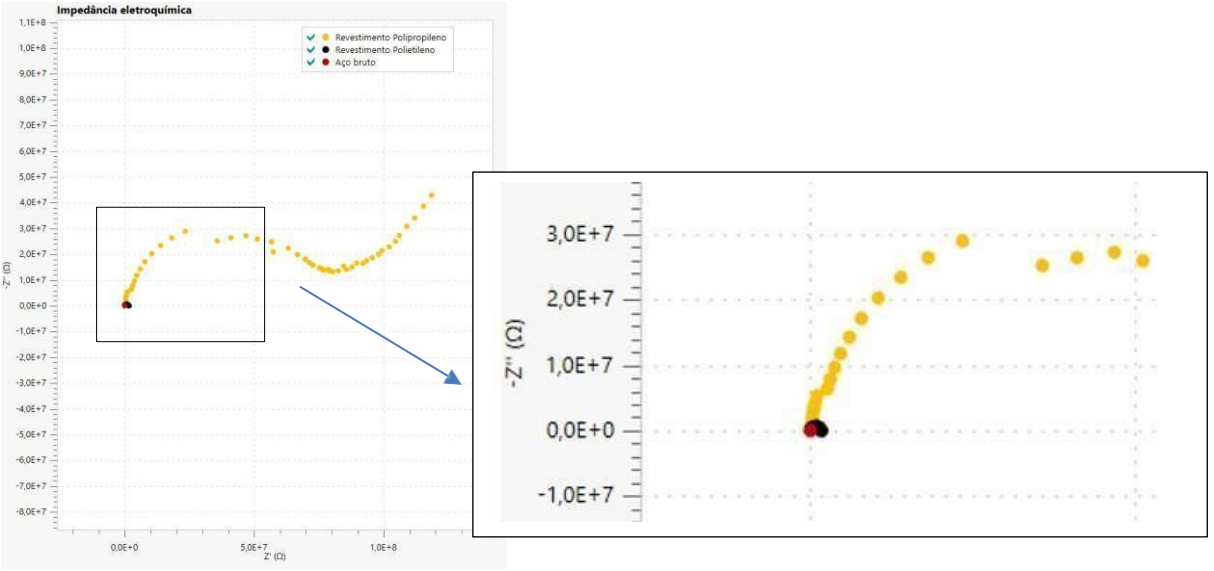
Data	Amostra	Potencial	Taxas de Corrosão
30/10	Aço Bruto	-0,56 v	0,016 mm/ano
14/11	Revestimento Polipropileno	-0,14 v	$9{,}5 \times 10^{-8}$ mm/ano
22/11	Revestimento Polietileno	-0,42v	$5{,}9 \times 10^{-7}$ mm/ano

Fonte: O autor, 2024

A taxa de corrosão teve uma diminuição de 27 vezes, com $5{,}9 \times 10^{-7}$mm/ano de corrosão na superfície do material, entre a amostra do aço bruto/revestimento polietileno. Já a comparação aço bruto/revestimento polipropileno, houve uma melhora ainda maior na resistência, com uma diminuição de aproximadamente 168 vezes, sendo $9{,}5 \times 10^{-8}$mm/ano de corrosão superficial.

Para confirmação dos dados referente ao aumento de resistência entre os materiais com revestimento e o aço bruto, foi realizado o método de impedância eletroquímica, conforme Figura 15, este ensaio é uma técnica não destrutiva, mas tem por função detalhar níveis de resistência ao processo corrosivo, onde foram obtidas curvas que demonstram ilustrativamente esses conceitos.

Figura 15 – Gráfico de Impedância Eletroquímica



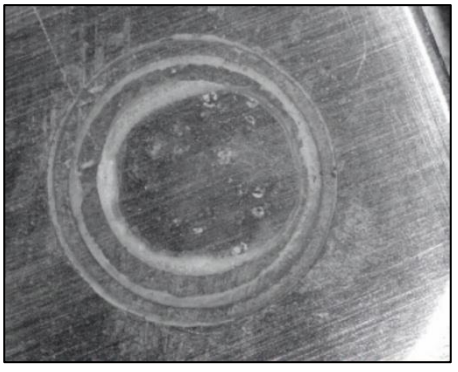
Fonte: O autor, 2024

A literatura aponta que, quanto maior o tamanho do arco no gráfico apresentado, maior a resistência desse material a corrosão, e os resultados destacaram que a amostra com revestimento de polipropileno possui um valor muito superior de resistência à corrosão eletroquímica em relação as outras amostras, consolidando os resultados obtidos pelas curvas de polarização.

4.3. Microscopia ótica após ensaio eletroquímico

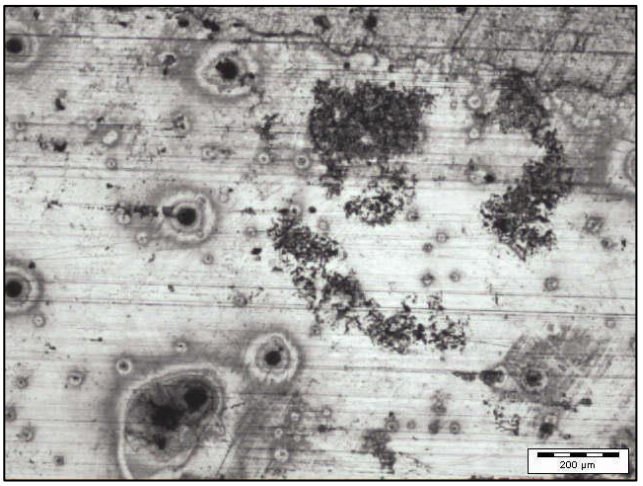
Após as análises, as amostras foram registradas por microscopia óptica para se apresentar as condições superficiais pós ensaio, e observou-se nas imagens os pequenos pontos de corrosão onde foram acometidos segundo Figuras 16 e 17 logo abaixo.

Figura 16 – Amostra Ensaiada com Ampliação de 6,7x



Fonte: O autor, 2024

Figura 17 – Amostra Ensaiada com Ampliação de 40x



Fonte: O autor, 2024

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que a proteção superficial é de suma importância quando se trata de durabilidade de um equipamento e prevenção de qualquer retrabalho ou prejuízo futuro. Os revestimentos trouxeram benefícios em níveis de corrosão e, foi observado neste trabalho com os resultados que o revestimento polimérico fez uma grande diferença na resistência à corrosão em relação a um material sem proteção superficial.

Tanto a amostra com revestimento de polietileno quanto a amostra com revestimento de polipropileno desempenharam valores superiores a se comparar com a amostra de aço bruto, sendo a de revestimento em polipropileno a proteção que sobressaiu como a mais viável oferecendo a melhor conservação superficial, apresentando os valores mais baixos de taxa de corrosão. Portanto, com os resultados apresentados pode-se visualizar a importância de se aplicar revestimentos para proteção dos equipamentos que são submetidos a ambientes agressivos, para diminuir os riscos de contaminação por alguma falha, trazendo benefícios econômicos para as empresas, poupando retrabalhos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALBERTI, S.M et al. **AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA CORRELACIONADA À MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS UTILIZADAS NO SETOR ELÉTRICO**. Curitiba: Copel, 2003.

ARAÚJO, Marlon G. de. **FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE TUBOS DE AÇO CARBONO EM PROCESSOS INDUSTRIAIS.** Campos dos Goytacazes: Universo, 2015.

CALLISTER,W.D.**CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: UMA INTRODUÇÃO**. 7ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos – LTC, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **AÇOS RESISTENTES À CORROSÃO**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2008.

GENTIL, Vincent. **CORROSÃO**, Rio de Janeiro: Editora LTC, 2007.

GENTIL, Vincent. **CORROSÃO**, 6ª ed., LTC: Rio de Janeiro, 2011.

JAMBO, H. C. M.; FÓFANO, S. Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle. Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2008.

LAQUE, F. L. **MARINE CORROSION**. Nova York: John Wiley & Sons, 1975.

LOUREIRO, A., BRASIL, S. & YOKOYAMA, L. Estudo da corrosividade de solo contaminado por substâncias químicas através de ensaios de perda de massa e índice de steinrath. **CORROSÃO E PROTECÇÃO DE MATERIAIS**, Lisboa-Portugal, v.26, n.4, p.113-121, 2007.

Química Nova vol.29 no.4 São Paulo Jul/Ago. 2006.

REVESTIMENTOS EM TUBOS DE AÇO. Pindamonhangaba: Cipa, 06 maio 2011. Disponível em: https://cipanet.com.br. Acesso em: 10 ago. 2024.

ROGÉRIO, A. H., OLIVEIRA, D. P. D., SOARES, E., MOREIRA, J. P. A., & BANHOS, L. A. G. **ESTUDO SOBRE UMA EDIFICAÇÃO INDUSTRIAL EM ESTRUTURA METÁLICA**, 2018.

SILVA, A. L. **AÇOS E LIGAS ESPECIAIS**. São Paulo: Blucher, 2010.

SILVA, Marcos V. F., PEREIRA, Marinalda C., CODARO, Eduardo N. &

ACCIARI, Heloisa A. **CORROSÃO DO AÇO-CARBONO: UMA ABORDAGEM DO COTIDIANO NO ENSINO DE QUÍMICA**. Guaratinguetá: Química Nova, 2014.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS MATERIAIS PROJETOS E MONTAGEM**. 10. ed. Rio de Janeiro, 2012.

TICIANELLI, E.A., GONZALEZ, E. R. **ELETROQUÍMICA: PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES**, 2ed, São Paulo, Edusp, 2005.

WOLYNEC, S. **TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS EM CORROSÃO**. São Paulo:Editora da Universidade de São Paulo, 2003.