



Corrosão e Tratamento de Superfície

Antônio Roberto de Oliveira



**Belém - PA
2012**

Presidência da República Federativa do Brasil
Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica

© Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Belém do Pará
Este caderno foi elaborado em parceria entre o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Belém do Pará e a Universidade Federal de Santa Maria para o Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil – Rede e-Tec Brasil.

Equipe de Elaboração – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Belém do Pará

Reitor

Edson Ary de O. Fontes/IFPA-Belém

Direção Geral

Darlindo Maria Pereira Veloso Filho/IFPA-Belém

Coordenação Institucional

Erick Alexandre de Oliveira Fontes/IFPA-Belém

Coordenação de Curso

Oscar Jesus Choque Fernandez/IFPA-Belém

Professor-autor

Antônio Roberto de Oliveira/IFPA-Belém

Equipe Técnica

Carlos Lemos Barboza/IFPA-Belém

Fabiano Darlindo Veloso/IFPA-Belém

Gisely Regina Lima Rebelo/IFPA-Belém

Wyllen Soares Pinheiro/IFPA-Belém

**Comissão de Acompanhamento e Validação
Colégio Técnico Industrial de Santa Maria/CTISM**

Coordenação Institucional

Paulo Roberto Colusso/CTISM

Coordenação Técnica

Iza Neuza Teixeira Bohrer/CTISM

Coordenação de Design

Erika Goellner/CTISM

Revisão Pedagógica

Andressa Rosemárie de Menezes Costa/CTISM

Francine Netto Martins Tadielo/CTISM

Marcia Migliore Freo/CTISM

Revisão Textual

Eduardo Lehnhart Vargas/CTISM

Lourdes Maria Grotto de Moura/CTISM

Vera da Silva Oliveira/CTISM

Revisão Técnica

Valdir Bólico Araújo/CTISM

Diagramação

Leandro Felipe Aguiar Freitas/CTISM

Ilustração

Marcel Santos Jacques/CTISM

Rafael Cavalli Viapiana/CTISM

Ricardo Antunes Machado/CTISM

Setor de Processamento Técnico – Biblioteca IFPA – Campus Belém

048

Oliveira, Antônio Roberto de.
Corrosão e tratamento de superfície / Antônio Roberto de
Oliveira. — Belém : IFPA ; Santa Maria : UFSM, 2012.
104p.

1. Corrosão. 2. Tratamento de superfície. I. Escola Técnica
Aberta do Brasil. II. Título.

CDD: 671.7

Apresentação e-Tec Brasil

Prezado estudante,

Bem-vindo ao e-Tec Brasil!

Você faz parte de uma rede nacional pública de ensino, a Escola Técnica Aberta do Brasil, instituída pelo Decreto nº 6.301, de 12 de dezembro de 2007, com o objetivo de democratizar o acesso ao ensino técnico público, na modalidade a distância. O programa é resultado de uma parceria do Ministério da Educação, por meio das Secretarias de Educação a Distância (SEED) e de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC), as universidades e escolas técnicas estaduais e federais.

A educação a distância no nosso país, de dimensões continentais e grande diversidade regional e cultural, longe de distanciar, aproxima as pessoas ao garantir acesso à educação de qualidade e ao promover o fortalecimento da formação de jovens moradores de regiões distantes dos grandes centros geográfica e ou economicamente.

O e-Tec Brasil leva os cursos técnicos a locais distantes das instituições de ensino e para a periferia das grandes cidades, incentivando os jovens a concluir o ensino médio. Os cursos são ofertados pelas instituições públicas de ensino, e o atendimento ao estudante é realizado em escolas-polo integrantes das redes públicas municipais e estaduais.

O Ministério da Educação, as instituições públicas de ensino técnico, seus servidores técnicos e professores acreditam que uma educação profissional qualificada – integradora do ensino médio e da educação técnica, – é capaz de promover o cidadão com capacidades para produzir, mas também com autonomia diante das diferentes dimensões da realidade: cultural, social, familiar, esportiva, política e ética.

Nós acreditamos em você!

Desejamos sucesso na sua formação profissional!

Ministério da Educação
Janeiro de 2010

Nosso contato
etecbrasil@mec.gov.br



Indicação de ícones

Os ícones são elementos gráficos utilizados para ampliar as formas de linguagem e facilitar a organização e a leitura hipertextual.



Atenção: indica pontos de maior relevância no texto.



Saiba mais: oferece novas informações que enriquecem o assunto ou “curiosidades” e notícias recentes relacionadas ao tema estudado.



Glossário: indica a definição de um termo, palavra ou expressão utilizada no texto.



Mídias integradas: sempre que se desejar que os estudantes desenvolvam atividades empregando diferentes mídias: vídeos, filmes, jornais, ambiente AVEA e outras.



Atividades de aprendizagem: apresenta atividades em diferentes níveis de aprendizagem para que o estudante possa realizá-las e conferir o seu domínio do tema estudado.



Sumário

Palavra do professor-autor	9
Apresentação da disciplina	11
Projeto instrucional	13
Aula 1 – Formas e tipos de corrosão: aspectos técnicos	15
1.1 Vamos refletir.....	15
1.2 Princípios do processo de corrosão.....	15
1.3 Formas e tipos de corrosão.....	18
1.4 Heterogeneidades responsáveis pela corrosão.....	25
Aula 2 – Limpeza e preparo de superfícies metálicas	33
2.1 Vamos refletir.....	33
2.2 Impurezas metálicas.....	33
2.3 Meios de remoção.....	35
Aula 3 – Meios corrosivos	43
3.1 Vamos refletir.....	43
3.2 Classificação geral dos meios de corrosão.....	43
3.3 Heterogeneidades dos meios de corrosão.....	53
Aula 4 – Revestimentos metálicos	59
4.1 Vamos refletir.....	59
4.2 Processos de revestimentos metálicos.....	59
4.3 Aplicações de revestimentos metálicos.....	60
Aula 5 – Revestimentos não metálicos inorgânicos	63
5.1 Vamos refletir.....	63
5.2 Processos de revestimentos não metálicos.....	63
5.3 Aplicações de revestimentos não metálicos.....	64
Aula 6 – Tintas e polímeros	67
6.1 Vamos refletir.....	67
6.2 Tintas.....	67

6.3 Mecanismos de proteção.....	70
6.4 Sistemas de pinturas.....	71
Aula 7 – Proteção catódica.....	75
7.1 Vamos refletir.....	75
7.2 Mecanismos e métodos de proteção.....	75
7.3 Aplicação.....	81
7.4 Proteção catódica por corrente impressa.....	82
Referências.....	103
Currículo do professor-autor.....	104

Palavra do professor-autor

Meus amigos alunos. Este é um momento muito significativo para uma relação que deve ser realizada com sucesso. Sejam todos bem-vindos.

Esta disciplina tem como objetivo principal oferecer um olhar profissional, técnico e instigativo sobre o universo da pesquisa sobre Corrosão Metálica.

Esse mundo do século XXI exige do profissional permanentes reflexões sobre responsabilidade social, responsabilidades técnicas seguidas de avaliações sobre as consequências causadas pelos materiais em processo corrosivo.

A todo instante, em qualquer área do conhecimento, temos exemplos dos prejuízos causados por pontes, estruturas e equipamentos com processos de corrosão que geram graves custos diretos e indiretos no país.

Esse mundo onde a qualidade é normativa de padronização da eficiência, eficácia e grau de competências profissionais, as responsabilidades com a aprendizagem desta disciplina intensificam nossas responsabilidades como professor e alunos.

Considerando o contexto, o aluno, nesse momento, já tem conhecimento das disciplinas que garantem o pré-requisito para a compreensão da disciplina de Corrosão Metálica e Tratamento de Superfície, a exemplo de Química Aplicada, Resistência dos Materiais, Eletrotécnica Básica e outras.

Da mesma maneira, em uma indústria, para que se tenha como foco a qualidade de um produto e de todo processo industrial, a disciplina Corrosão Metálica e Tratamento de Superfície deve proporcionar permanente momento para reflexões, de maneira que o aluno possa desenvolver competências e adquirir a habilidade de perceber os fenômenos das ciências que oferecem base para a aprendizagem da corrosão metálica e suas ligas.

Portanto, temos a responsabilidade conjunta de realizar *feedback* da aprendizagem na sua trajetória, possibilitando nossa sedimentação conceitual fenomenológica, transformando a formação teórica na aplicação prática na indústria.

Finalmente, no século XXI, quando todos os olhares do mundo industrial estão voltados para os níveis de competência e, dentre elas, as mais importantes são as que nos remetem às responsabilidades sociais, a disciplina Corrosão Metálica e Tratamento de Superfície nos proporciona a oportunidade de reflexão profunda sobre inúmeras relações com o universo da ética, da qualidade profissional, do respeito humano, da eficiência e da eficácia de nossas atribuições profissionais, no mundo do trabalho.

Enfim, esta disciplina permitirá, dentre tantas formas de aprendizagem, uma que marcará profundamente a maneira de olhar a formação técnica mais do que apenas uma maneira de ganhar dinheiro e ter sucesso no emprego. É importante também compreender que as nossas competências profissionais estão diretamente conectadas com a sustentabilidade do ecossistema do planeta.

Boa sorte para todos.

Apresentação da disciplina

Esta disciplina foi preparada para ser desenvolvida em sete aulas. Nela estudar-se-ão os conceitos básicos de corrosão metálica. Com exemplos práticos estaremos contextualizando a teoria que aponta os diversos tipos e formas de corrosão metálica seguida do conhecimento sobre taxa de corrosão e da relação custo benefício.

Na segunda aula, conheceremos os principais sistemas de limpeza e preparação de superfícies metálicas para o aluno ter a oportunidade de compreender os vários métodos de preparação e limpeza de superfícies de materiais metálicos, através de sistemas de tratamento mecânico ou de tratamento químico.

Na terceira aula, serão desenvolvidos estudos para as identificações dos diversos meios que propiciam as condições de formação do processo corrosivo, comparando as relações de agressividade, através de inúmeras variáveis a cada situação de corrosão.

Apresentaremos também comparações com ambientes industriais que afetam diretamente os materiais metálicos e suas ligas produzindo processos corrosivos e alterando suas respectivas taxas de corrosão, diante das heterogeneidades existentes a cada situação específica de variáveis presentes intensificando desta maneira o processo corrosivo.

Nas quarta e quinta aulas estaremos explorando os primeiros mecanismos de manutenção preventiva e corretiva, apontando os métodos de tratamento anticorrosivos na aplicação de revestimentos metálicos e de revestimentos não metálicos inorgânicos.

Na sexta aula, após a compreensão dos primeiros métodos de revestimentos aplicados nas superfícies metálicas com objetivo de proteger contra a corrosão, serão apresentados os conceitos e características dos sistemas de pintura através de fluxogramas que mostram os principais constituintes.

Finalmente, na sétima aula ocorrerá a apresentação do método de proteção catódica por corrente impressa e/ou através de ânodos de sacrifícios. Nesta

etapa da aprendizagem será possível realizar apontamentos da qualidade do processo de proteção e seus mecanismos de controle e benefícios relativos à proteção de superfícies metálicas e suas ligas. Ainda será possível direcionar exemplos práticos de análises e aplicações do processo de proteção catódica em superfícies metálicas e suas ligas.

Bom estudo!

Projeto instrucional

Disciplina: Corrosão e Tratamento de Superfície (carga horária: 60h).

Ementa: Formas e tipos de corrosão: aspectos técnicos. Limpeza e preparo de superfícies metálicas. Meios corrosivos. Revestimentos metálicos. Revestimentos não metálicos inorgânicos. Tintas e polímeros. Proteção catódica.

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
1. Formas e tipos de corrosão: aspectos técnicos	Identificar as diferentes formas, tipos e princípios do processo de corrosão. Compreender um processo corrosivo e descrever os principais ensaios de corrosão. Identificar o tipo de corrosão, avaliar e calcular a taxa de corrosão nos materiais metálicos.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	08
2. Limpeza e preparo de superfícies metálicas	Identificar as diferentes impurezas metálicas. Compreender e identificar os meios de remoção das impurezas metálicas.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	08
3. Meios corrosivos	Identificar e classificar os diferentes meios de corrosão.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	08
4. Revestimentos metálicos	Classificar os processos de revestimentos metálicos. Aplicar diferentes técnicas de proteção da superfície metálica através de revestimentos metálicos.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	08
5. Revestimentos não metálicos inorgânicos	Identificar e classificar os processos de revestimentos não metálicos. Aplicar técnicas de tratamento de superfícies metálicas através do uso de revestimentos não metálicos inorgânicos.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	08
6. Tintas e polímeros	Identificar e classificar as tintas e seus elementos constituintes. Classificar os diferentes mecanismos de proteção. Classificar e identificar os diferentes sistemas de pintura.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	08

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
7. Proteção catódica	<p>Selecionar técnicas de proteção que utilizem a proteção catódica por corrente impressa ou por ânodo de sacrifícios.</p> <p>Aplicar cálculos para obtenção da corrente de proteção para escolha do método de proteção catódica através de relações custo-benefício em superfícies metálicas.</p>	<p>Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i>.</p> <p>Apostila didática.</p> <p>Recursos de apoio: <i>links</i>, exercícios.</p>	

Aula 1 – Formas e tipos de corrosão: aspectos técnicos

Objetivos

Identificar as diferentes formas, tipos e princípios do processo de corrosão.

Compreender um processo corrosivo e descrever os principais ensaios de corrosão.

Identificar o tipo de corrosão, avaliar e calcular a taxa de corrosão nos materiais metálicos.

1.1 Vamos refletir

Imaginem um portão de ferro de uma residência onde se percebe o surgimento na superfície de um produto ou substância sobre o revestimento do metal, comprometendo a qualidade e estética da pintura de acabamento do portão. Sob esse olhar indagador fica uma questão: Será que esse fenômeno ocorre de outras formas e em outros materiais metálicos? Quanto tempo esse portão vai ter resistência depois de este produto alcançar toda a sua superfície?

São questões que precisam ser respondidas sob princípios técnicos e, para encontrarmos as respostas, é importante conhecer as formas e tipos de corrosão e seus aspectos técnicos.

1.2 Princípios do processo de corrosão

Quando falamos em processo de corrosão, estamos falando de reações químicas heterogêneas ou de reações eletroquímicas que normalmente ocorrem na interface ou superfície de separação entre o metal e o meio corrosivo.

Precisamos então rever as reações eletroquímicas que foram apresentadas na Química Aplicada à Metalurgia.

Sabendo que as reações de oxidação-redução são as reações químicas que cedem ou recebem elétrons, podemos associar os processos de corrosão com

reações de oxidação dos metais e que, sendo esses metais oxidados, vão agir como redutores, pois cedem elétrons que, com certeza, são recebidos por alguma substância que tem a função oxidante no meio corrosivo.

1.2.1 Alguns conceitos importantes

A corrosão é resultado de uma reação de oxidação de um metal em presença de alguma substância ou elemento que sofre redução. É também todo processo eletroquímico que produz degradação e perda de propriedades químicas, físico-químicas ou mecânicas do material metálico.

A relação contextual da corrosão metálica segue a ideia da imagem apresentada na Figura 1.1, onde os produtos industriais de conformação e produção de aço, de ferro e de ligas metálicas em geral, quando ocorrerem reações com perda de energia, vão produzir produtos de corrosão, ou seja, sofrerão degradação física, química e mecânica.

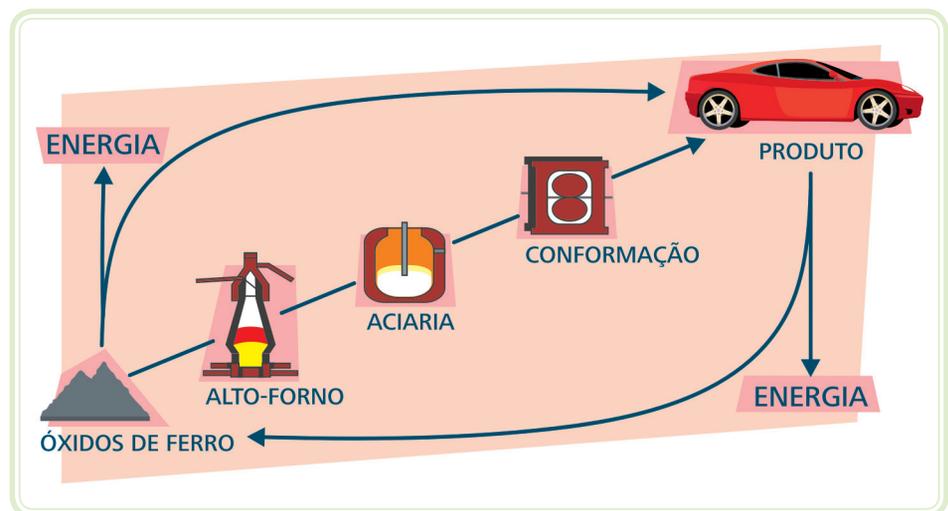


Figura 1.1: Fundamentos de corrosão

Fonte: Pannoni, 2008

A corrosão é uma forma de degradação do metal. É um processo que progride através do material até sua destruição total. Nessa etapa de compreensão, o primeiro passo é descobrir e investigar os tipos e formas de corrosão, desde o aspecto microscópico até sua exposição a olho nu. A Figura 1.2 apresenta uma explicação sobre o processo da corrosão.

O conhecimento das características das diferentes formas de corrosão, facilita o encontro das técnicas necessárias e dos mecanismos de proteção do metal que sofre corrosão. Isso possibilita a análise necessária para a aplicação de medidas preventivas capazes de reduzir a valores desprezíveis a taxa de corrosão.

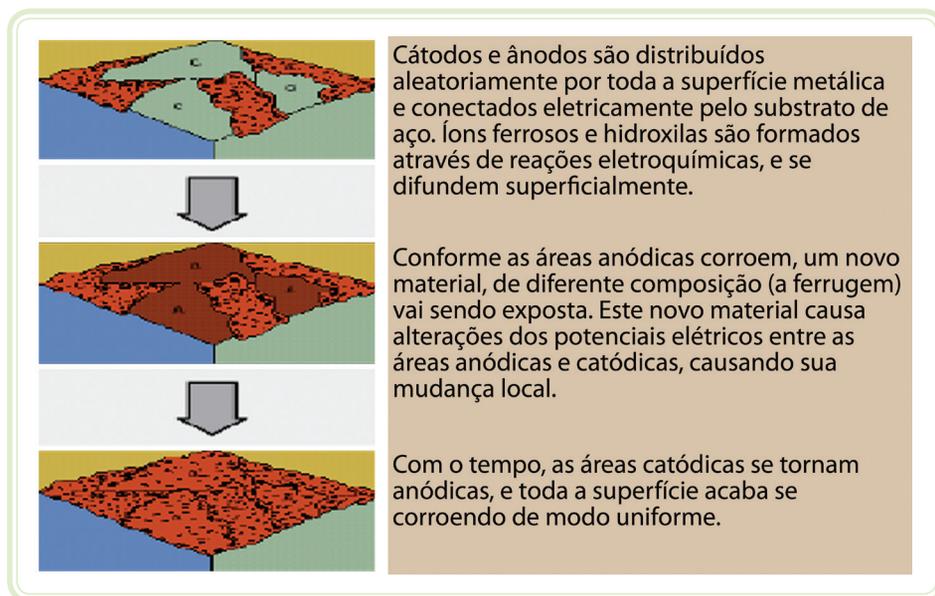


Figura 1.2: Fundamentos de corrosão

Fonte: Pannoni, 2008

O potencial de um metal é medido em uma solução pela energia liberada ou cedida. Quando ele corrói, passa a ser chamado de potencial de corrosão, logo, ele é medido em função de um potencial padrão.

Em termos práticos, o que ocorre e interessa é a intensidade ou a velocidade de corrosão, que é dada pela quantidade de corrente que flui entre os eletrodos, pois de acordo com a Lei de Ohm, a corrente é proporcional ao potencial para um dado valor de resistência.

A diferença de potencial denominada de ddp de uma pilha é indicada pelo voltímetro no instante em que ela fecha o circuito.

$$\text{f.e.m. da pilha} = \Delta E^\circ = E^\circ \text{ oxidante (cátodo)} - E^\circ \text{ redutor (ânodo)}$$

“ $\Delta E^\circ > \text{ZERO}$ ”, a reação é espontânea.

Nesse momento é preciso que se faça uma revisão de Química Aplicada. O que significa uma reação reversível? O que significa eletrodo de hidrogênio? Por que a união internacional de Química Pura e Aplicada, recomenda aplicar o potencial de redução e a reação de redução nos cálculos? Você sabe explicar porque o que cede elétrons tem potencial mais alto e porque é utilizada a equação que segue?

A-Z

E°
Potencial padrão.

ΔE°
Variação de potencial padrão.

Equação 1.1

$$\Delta E = \Delta E^{\circ} - \frac{0,059 \log Q}{n}$$

Onde: $Q = K$

n = número de elétrons

Q = carga elétrica

K = constante de equilíbrio

1.3 Formas e tipos de corrosão

A corrosão pode ser uniforme, por placas, alveolar, puntiforme, intergranular ou intercrystalina, intragranular ou transcristalina, filiforme, por esfoliação, galvânica e pode receber outros nomes que justifiquem a forma analisada.

A corrosão uniforme (Figura 1.3) é a que se processa em toda a extensão da superfície e sua principal característica é a perda uniforme de espessura, chamada também de corrosão generalizada. Ela pode ocorrer através de uma reação química ou eletroquímica e do ponto de vista técnico, é uma corrosão que não traz grandes problemas, pois é fácil de programar a vida útil do material que passa por esse tipo de degradação física e química.

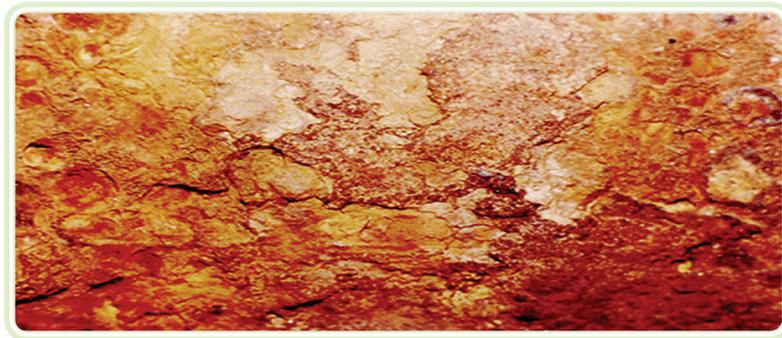


Figura 1.3: Corrosão uniforme em chapa de aço-carbono

Fonte: Gentil, 1996

A corrosão formada por placas (Figura 1.4) é a que se localiza em regiões de superfície metálica e não em toda sua extensão, caracterizando-se por apresentar uma espécie de escavação no material.

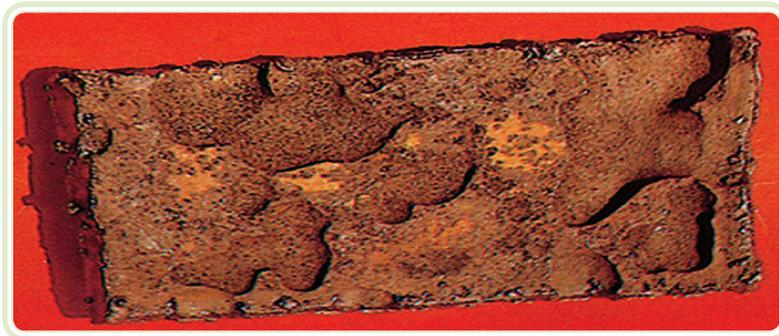


Figura 1.4: Corrosão em placas

Fonte: Gentil, 1996

A corrosão alveolar (Figura 1.5) se processa na superfície metálica produzindo sulcos com certa profundidade, sempre inferiores ao seu diâmetro de superfície. Sua principal característica são sulcos semelhantes a alvéolos com fundo arredondado. É um tipo de corrosão localizada.

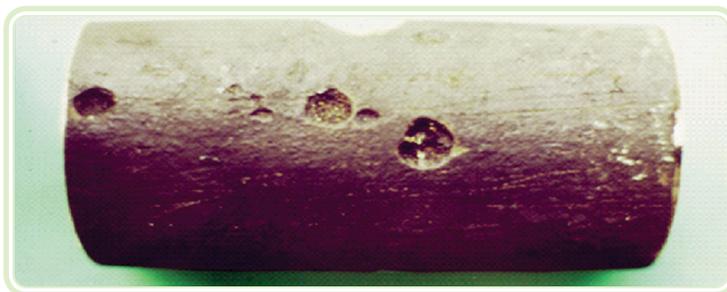


Figura 1.5: Corrosão alveolar

Fonte: Gentil, 1996

A corrosão puntiforme (Figura 1.6) se processa ponto a ponto, em pequenas áreas localizadas na superfície metálica, produzindo uma espécie de *pites* ou simplesmente furos que são cavidades em forma angulosa com profundidades superior ao diâmetro de superfície do furo. Alguns autores chamam-na de corrosão por *pitting*.



Figura 1.6: Corrosão por pite em aço inoxidável

Fonte: Gentil, 1996

Essas três últimas formas de corrosão são simplificadaamente chamadas por alguns autores de corrosão por *pites* arredondados ou *pites* angulosos ou então denominadas de puntiformes.

O trabalho a frio e superfícies rugosas facilitam o ataque corrosivo dos *pites* nos materiais à base de carbono e ferro, denominados de aços, acelerando a corrosão quando em presença de íons cloretos, tornando um processo autocatalítico.

A corrosão intergranular (Figura 1.7) é a que ocorre entre os grãos ou cristais da rede cristalina do material metálico, apresentando como característica principal a perda de suas propriedades mecânicas cujo resultado é a fratura do material quando forem realizados por esforços mecânicos. Daí, quando ocorre a fratura, a corrosão passa a ser chamada de corrosão sob tensão fraturante (*stress corrosion cracking*).



Figura 1.7: Corrosão intergranular ou intercristalina

Fonte: Gentil, 1996

A corrosão intragranular (intra = dentro) é a que ocorre dentro dos cristais do material metálico. Ela ocorre através da perda de propriedades mecânicas, podendo fraturar o material a qualquer momento, quando submetido a qualquer tipo de esforço mecânico.

Se isso ocorrer em uma superfície metálica, uma simples corrosão intragranular passa a ser chamada de corrosão sob tensão fraturante.

Existem circunstâncias que tornam a região de um contorno de grão muito reativa, provocando a corrosão intergranular ou intragranular. Isso significa uma desintegração da liga ou perda da resistência mecânica. A presença de impurezas é a grande causa dessa corrosão. Ela reduz o elemento no contorno de grão e enriquece o contorno de grão por um elemento de liga. Como os aços inoxidáveis ficam empobrecidos de cromo (Cr) nas áreas adjacentes ao contorno de grão pela precipitação de carbonetos de cromo (Cr_{23}C_6), a resistência vai ser então reduzida.

Alguns autores falam de uma corrosão por erosão (Figura 1.8), que é um fenômeno físico-químico onde há o aumento da taxa de deterioração do metal provocado pelo movimento do fluido em contato com a superfície metálica. Quanto maior for a velocidade do fluido, maior será a taxa desse tipo de corrosão, capaz de ocorrer até em ligas e metais altamente resistentes a um determinado meio corrosivo a baixas velocidades.

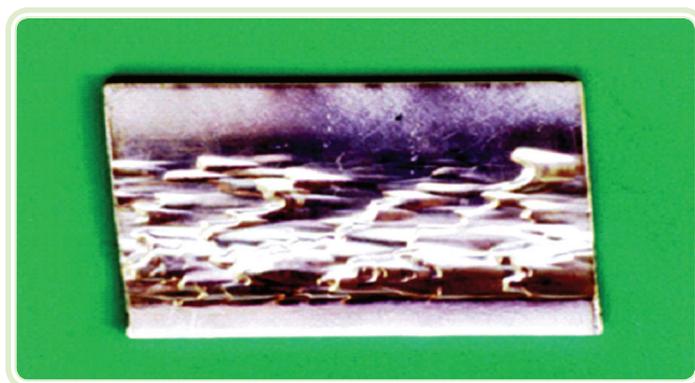


Figura 1.8: Erosão em aço inoxidável ocasionada por líquido contendo sólidos suspensos
Fonte: Gentil, 1996

Caso ocorra contato galvânico, a corrosão por erosão aumenta seu efeito de destruição, conforme a Figura 1.9.

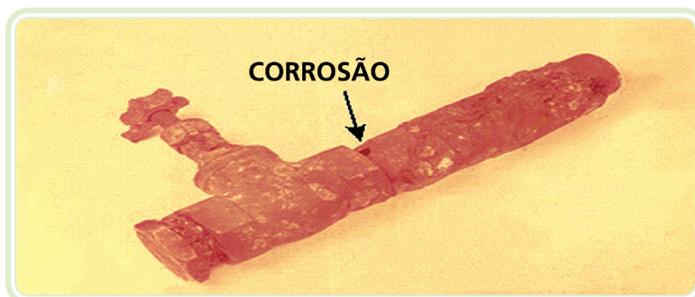


Figura 1.9: Corrosão galvânica em tubo de aço-carbono em contato com válvula de latão
Fonte: Gentil, 1996

Esse tipo de corrosão tem seu nível máximo de agravamento quando começa a ocorrer o fenômeno de cavitação provocado pelo colapso de bolhas de vapor em um fluido, próximo à superfície metálica.

As condições em que a corrosão se encontra são de fundamental importância para a análise sobre o tipo de corrosão e sua conseqüente forma. Exemplo disso, é que corrosões do tipo que ocorrem sob tensão não dependem diretamente de solicitações mecânicas aplicadas, bastando que existam no material as chamadas tensões residuais que normalmente são provocadas por tratamentos térmicos, trabalhos a frio, encruamentos em geral e outros tipos com características cíclicas.

No entanto, quando um material apresenta corrosão do tipo sob tensão (Figuras 1.10 e 1.11), quaisquer meios corrosivos em contato criam variáveis que tornam impossível prever o fenômeno de tensão fraturante sob corrosão.



Figura 1.10: Corrosão sob tensão fraturante em tubo de aço inox AISI 304
Fonte: Gentil, 1996

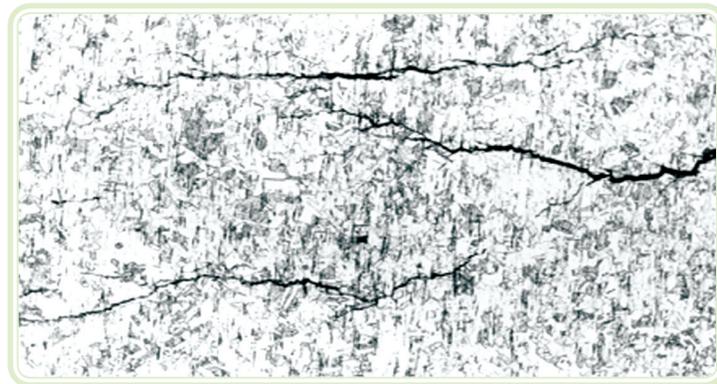


Figura 1.11: Corrosão transgranular ou transcristalina
Fonte: Gentil, 1996

A corrosão filiforme se processa sob a forma de finos filamentos que se propagam em diferentes direções e se cruzam. A grande característica é sua ocorrência em superfícies metálicas revestidas com tintas ou com metais pelo processo de metalização, pois produzem o deslocamento do revestimento.

Esse tipo de corrosão ocorre quando existe certa umidade do ar, em torno de 90% e, principalmente em revestimentos muito permeáveis à penetração de oxigênio, que produz aeração diferencial ou em superfícies que possuem falhas siderúrgicas.

A corrosão por esfoliação se processa em diferentes camadas, apresentando um produto de corrosão que fica entre a estrutura de grãos alongados e, com isso, separa as camadas, ocasionando uma espécie de inchamento do material metálico. Esse tipo de corrosão tem como característica principal uma laminação paralela à superfície metálica, sendo comum em ligas de alumínio.

1.3.1 Exemplos de outras formas de corrosão

Na Figura 1.12 temos o exemplo de uma forma de corrosão muito comum em flanges de alumínio produzindo frestas e esfoliação do material metálico.

Quando estamos na presença de múltiplas formas de corrosão precisamos ter o cuidado de analisar as variáveis existentes no meio onde este tipo de corrosão acontece.

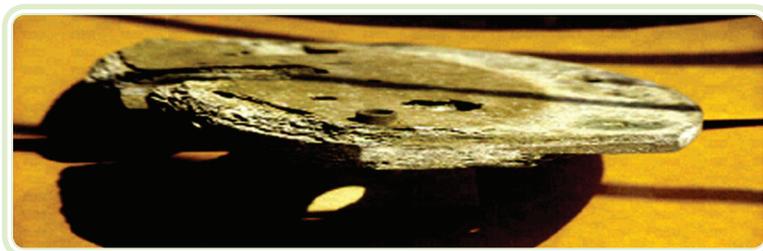


Figura 1.12: Flanges de alumínio em área industrial com corrosão por esfoliação

Fonte: Gentil, 1996

A corrosão metálica muitas vezes se apresenta sob condições termodinâmicas de alta complexidade. É preciso muita experiência nesse momento para identificar o tipo de corrosão atuante.

É possível analisar alguns exemplos de deterioração ligados aos processos corrosivos. Vamos estudar algumas dessas formas.

A corrosão chamada de grafítica (Figura 1.13) possui característica seletiva e se processa no ferro fundido quando colocado em temperatura ambiente, fazendo com que o ferro metálico seja convertido em produtos de corrosão, restando então a grafite intacta.



Figura 1.13: Retirada das incrustações e evidência da corrosão grafítica: parte escura da fotografia

Fonte: Gentil, 1996

O que significa ferro fundido? Significa uma liga de ferro carbono onde o ferro está na forma combinada, formando carboneto de ferro ou, simplesmente cementsita (Fe_3C), junto com o carbono na forma gráfica. Quando se observa esse tipo de corrosão, verifica-se que a área corroída fica com aspecto escuro, característica do grafite que pode ser facilmente retirada do material com espátula.

Da mesma maneira, podemos analisar a corrosão chamada de dezincificação. É um fenômeno corrosivo que se processa nas ligas de cobre-zinco, denominado de latão e tem como característica o surgimento de uma coloração avermelhada. Essa coloração contrasta com a cor característica do latão que é o amarelo. Como é um tipo de corrosão seletiva, o zinco tem preferência de corrosão, em virtude de seu potencial eletroquímico, enriquecendo o cobre com sua cor característica que é o vermelho, conforme vemos nas Figuras 1.14 e 1.15.

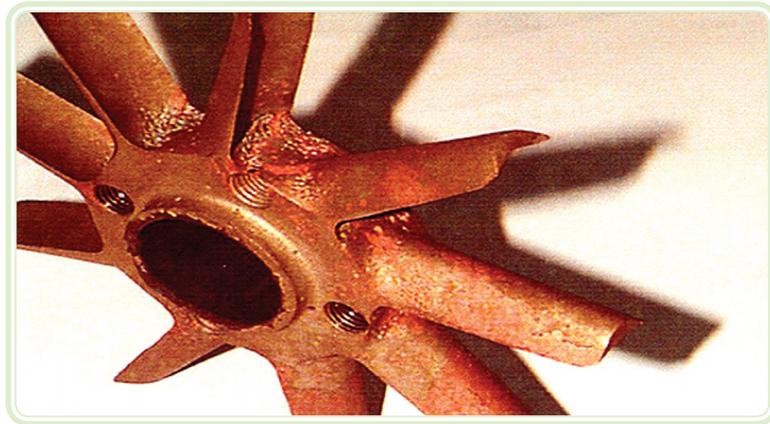


Figura 1.14: Coloração avermelhada em áreas do impelidor

Fonte: Gentil, 1996

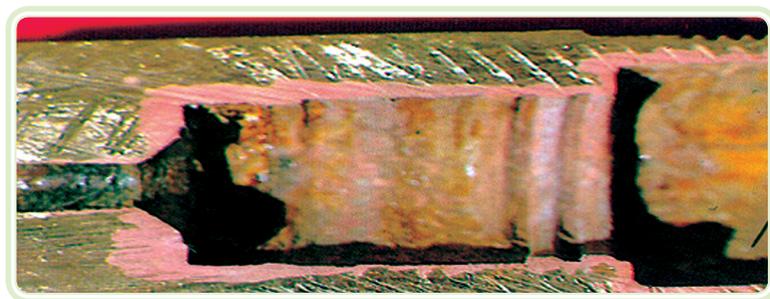


Figura 1.15: Dezincificação em parte interna de componente de latão: coloração avermelhada contrastando com a amarelada do latão

Fonte: Gentil, 1996

Existem relatos pela experiência técnica, que a liga de latão mais sujeita ao processo corrosivo denominado corrosão seletiva é a liga com 70% (setenta por cento) de cobre e com 30% (trinta por cento) de zinco.

Se os ácidos corroem os metais, como fica o hidrogênio do ácido em um processo corrosivo?

Existe uma situação em que o hidrogênio atômico penetra nos metais e em função do seu pequeno volume atômico, vai se difundindo em regiões microscópicas de descontinuidades, como: inclusões e vazios, até se transformar em hidrogênio molecular (H_2), cuja pressão exercida vai produzir bolhas e ocasionar uma corrosão denominada empoamento pelo hidrogênio, podendo vir a fraturar o material.

É importante para a compreensão saber que esse tipo de corrosão se agrava quando está em contato com ácidos e água.

1.4 Heterogeneidades responsáveis pela corrosão

A corrosão pode ter características associadas ou se apresentar sob múltiplas situações, capazes de produzir degradação do material, envolvendo diferentes tipos que agravam a perda de massa e a redução acelerada das propriedades mecânicas e físico-químicas do material.



Figura 1.16: Exemplo de falhas no revestimento aplicado na superfície metálica com fita plástica e perfuração na tubulação

Fonte: Gentil, 1996

Exemplo dessa afirmativa é o tipo de corrosão intergranular causada durante o processo de soldagem ao longo de um cordão de solda, principalmente em aços inoxidáveis não estabilizados ou em aços inoxidáveis com teor de carbono superior a 0,03%. Quando ocorrer esse tipo de corrosão, é possível que, em meios e condições favoráveis de solicitações mecânicas, alcance a corrosão sob tensão fraturante.

1.4.1 Corrosão metálica

É o resultado da ação química destrutiva do meio em que um determinado material se encontra. Basta que uma das suas propriedades se modifique por reação com o meio ambiente, para afirmarmos que sofreu corrosão.

Borracha, concreto, vidro, madeira e polímeros em geral sofrem corrosão. O processo de corrosão dos metais e suas ligas, em função da grande importância industrial e social, reflete custos diretos e indiretos que são produzidos pela corrosão metálica. Hoje, existe uma estimativa em torno de 20% (vinte por cento) da produção industrial mundial de aços que são destinados à reposição de materiais que sofrem corrosão.



Figura 1.17: Falhas no revestimento com fita plástica e perfuração na tubulação

Fonte: Gentil, 1996

No Brasil, de 60% (sessenta por cento) da produção interna de aço, dois terços (2/3) se transformam em sucata e um terço (1/3) é destruído pela corrosão.

O estudo da corrosão visa mais do que ao interesse pela ocorrência mineral, mas aos custos provocados por ela, muitas vezes incalculáveis, que envolvem despesas com reposição de materiais, reparos e proteção, mão de obra, energia e manutenção, chamados de custos diretos.

Existem também custos indiretos que relacionam os acidentes, perdas de vida, qualidade, eficiência, contaminações e, ainda, outros custos gerados pela corrosão, impossíveis de serem medidos e que se manifestam ao longo do tempo.

Percebe-se a importância da corrosão como ciência, pelas inúmeras relações com outras áreas científicas. É preciso então analisar corrosão segundo os custos diretos e indiretos em função dos benefícios, sem esquecer as caracte-

rísticas técnicas e a qualidade do material a ser protegido. Em outras palavras, precisamos olhar a corrosão de forma holística, na sua importância como ciência metalúrgica.

Se ampliarmos nossa percepção técnica, é possível entender que uma corrosão do tipo galvânica cuja característica principal é o surgimento de uma diferença de potencial (ddp) entre dois metais de eletronegatividades ou potenciais diferentes em contato e imersos em meio corrosivo. Ora, o material menos resistente ou o que apresenta o potencial mais negativo, vai tornar-se anódico, porque sofre oxidação, sendo corroído, enquanto o material com potencial menos negativo torna-se catódico, porque sofre redução ou não sofre corrosão significativa.

A natureza e a agressividade do meio é que vão determinar o grau de corrosão galvânica. Caso se alterarem as condições do meio, é possível que o processo de corrosão possa ser invertido. Como é um tipo de corrosão localizada, à medida em que os metais estiverem mais próximos na escala de eletronegatividade, maior será o ataque corrosivo no ponto de corrosão.

Existe uma relação que exerce efeitos favoráveis e significativos na corrosão galvânica, que é a relação de área anódica e catódica:

Equação 1.2

$$\frac{\text{área anódica}}{\text{área catódica}} \gg 1$$

Existe uma espécie de corrosão chamada de corrosão de fresta que forma produtos de corrosão em locais que permitem a formação de aeração diferencial e o acúmulo de substâncias oxidantes, sendo mais comuns em situações de soldagem mal planejadas, chapas rebitadas, contatos de materiais metálicos com materiais de natureza orgânica. É um tipo de corrosão muito grave por ter uma característica autocatalítica em função da acidificação do meio em que se encontra o material metálico. A Figura 1.18 dá um exemplo desse tipo de corrosão.



Figura 1.18: Corrosão no apoio de tubulação

Fonte: Gentil, 1996

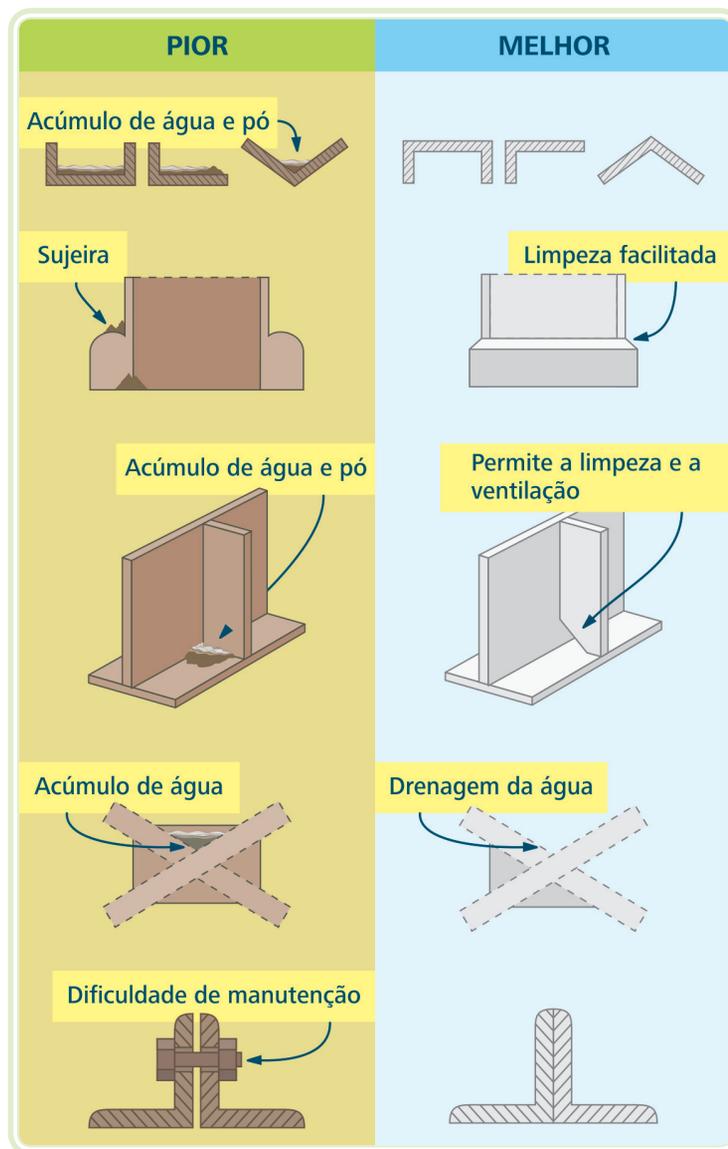


Figura 1.19: Cuidados preventivos da corrosão

Fonte: Pannoni, 2008

Em uma chapa como a representada no desenho, o material na área da corrosão apresenta a reação:

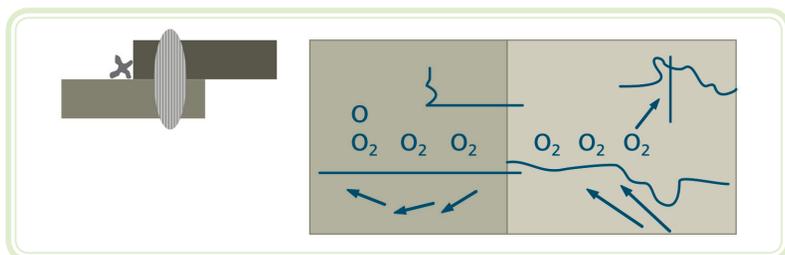


Figura 1.20: Esquema da corrosão por fresta

Fonte: Pannoni, 2008

Os íons halogênios ou o íon cloreto, se tornam mais contaminantes em virtude de seu pequeno tamanho atômico, o que facilita sua absorção e consequentemente aumenta a tensão superficial. Isso diminui a pressão de eletrostricção (pressão maior que 1 atm). Logo, o resultado é o rompimento da película e a formação do produto de corrosão.

A complexidade das condições do meio corrosivo exige estudo detalhado dos meios e variáveis envolvidos. Exemplo:

O ouro é mais resistente que o ferro em quase todos os meios aquosos, porém, o ouro em soluções oxigenadas de cianeto de sódio corrói, e o ferro não. As ligas de zircônio em oxigênio a 350°C possuem baixa velocidade de corrosão ou oxidação e o óxido formado é escuro, aderente e protetor, enquanto na temperatura acima de 750°C, o óxido é cinza ou branco, tem velocidade altíssima de oxidação e não é protetor.

Resumo

Nesta primeira aula apresentaram-se os princípios da eletroquímica que explicam o processo de corrosão e as diferentes formas e mecanismos de manifestação do fenômeno de corrosão metálica pelo processo eletroquímico, identificando as heterogeneidades do processo corrosivo.



Atividades de aprendizagem

1. Identifique os principais minérios e os respectivos minerais obtidos após beneficiamento. Quais as principais características de produtos de corrosão? Dê três exemplos.
2. A química aplicada tem uma importância fundamental na aprendizagem da disciplina corrosão metálica. As pilhas de combustão utilizadas em naves espaciais geram energia elétrica pela reação $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{energia}$. Como devem ocorrer as reações de redução e oxidação se usarmos KOH como solução? Qual a semipilha do ânodo e no cátodo?

R - Redução do gás oxigênio:
no cátodo = $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$

Oxidação do gás hidrogênio:
no ânodo = $2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- = 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$

3. De acordo com as reações apresentadas, qual é a soma das semireações de redução e oxidação das reações apresentadas na questão nº 2?
4. Se investigamos os agentes de corrosão do ferro é porque entendemos de oxirredução, mas quando colocamos dois metais diferentes, cada um em suas soluções de íons e os conectamos a um voltímetro, podemos medir seu potencial: $\text{Ag} = E^\circ = +0,8 \text{ V}$; $\text{Cu} = E^\circ = +0,3 \text{ V}$; $\text{Pb} = E^\circ = -0,1 \text{ V}$; $\text{Zn} = E^\circ = -0,8 \text{ V}$. Faça as semirreações de redução e calcule qual f.e.m. entre eles que é maior, sabendo-se que: f.e.m. = $E^\circ \text{ maior} - E^\circ \text{ menor}$.
5. Vamos fechar nosso raciocínio inicial sobre a importância da eletroquímica para a corrosão metálica. Dadas semipilhas de Mg, Ni, Cu, Ag, com seus respectivos potenciais de +2,34, +0,25, -0,35, -0,8 volts. Se ocorrerem reações entre os metais Mg e Ni, Ni e Cu, Ag e Mg, Ni e Ag respectivamente, seria possível responder: nas reações 1, 2, 3, 4 respectivamente, podemos dizer que apenas três são espontâneas? Após identificar as três reações espontâneas, calcular a f.e.m. das mesmas.

Assinale a alternativa correta.

- a) 1; 2; 3 f.e.m. = 2,91 V; 0,001 V; 14,3 V
- b) 1; 2; 3. f.e.m. = 2,09 V; 0,60 V; 3,14 V

c) 1; 2; 3 f.e.m. = 0,1 V; 0,001 V; 3,14 V

d) 1; 2; 3. f.e.m. = 2,09 V; 1,60 V; 3,14 V

e) todas as respostas erradas

6. A prova disso é que somos capazes de responder a qualquer questão relativa ao sistema de reações eletroquímicas. Vejamos qual das reações que seguem sofre reações de oxirredução:

a) $\text{H}_2\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2$

b) $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4$

c) $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{HCl} + \text{HClO}$

d) $\text{Cl}_2 + 2\text{NaOH} = \text{NaCl} + \text{NaClO} + \text{H}_2\text{O}$

e) todas as respostas estão certas

7. Como observamos, existem diversos tipos de corrosão. A partir das imagens apresentadas, pesquise três outras imagens de corrosão e as poste na plataforma com comentários pertinentes.

Aula 2 – Limpeza e preparo de superfícies metálicas

Objetivos

Identificar as diferentes impurezas metálicas.

Compreender e identificar os meios de remoção das impurezas metálicas.

2.1 Vamos refletir

Esta aula permitirá ao aluno a aprendizagem necessária para identificar os principais tipos de impurezas existentes em superfícies metálicas, tornando-o capaz de escolher o método ideal a cada tipo de impureza, de descrevê-las e classificá-las segundo critérios estabelecidos em normas técnicas.

2.2 Impurezas metálicas

A compreensão do que significam impurezas metálicas constitui uma etapa necessária para avançarmos em direção à aprendizagem dos métodos de proteção de superfícies metálicas, base da execução da pintura industrial.

O tratamento das impurezas metálicas é um passo decisivo no processo definido como esquema de pintura, uma vez que sua preparação varia em função do recobrimento protetor, ou seja, da natureza da tinta a ser aplicada. Como o objetivo é criar uma interface entre o meio corrosivo e a superfície do metal, essa camada protetora pode ser de formação natural ou artificial.

A resistência dessas camadas protetoras, associada à aderência, à impermeabilidade e à insolubilidade, é a característica mais importante a ser observada.

Como o ferro e o aço são materiais de maior consumo industrial, é preciso analisar o filme da oxidação que se forma em suas superfícies nos mais variados meios corrosivos.

Existem ainda os filmes autoprotetores comuns nos metais não ferrosos descontínuos, permeáveis e solúveis, capazes de levar o processo corrosivo até sua destruição total.

Alcançar a aderência ou eficiência máxima de proteção através de revestimentos ou recobrimentos protetores depende do processo adequado da superfície metálica receptora.

2.2.1 O que significa uma superfície metálica limpa?

Uma superfície bem limpa, livre de ferrugem, isenta de graxas, sujeira e umidade oferece a base necessária para uma boa proteção por recobrimento, pois uma superfície preparada para determinado acabamento pode não ser adequada a outro tipo de recobrimento.

Impureza é tudo o que pode interferir no processo e na qualidade da proteção que se pretende dar a uma determinada superfície.

2.2.2 Tipos de impurezas

- a) **Impurezas oleosas** – são os óleos minerais, óleos graxos, óleo de laminação, de estampagem, de repuxamento, de trefilação e óleos protetores contra a corrosão. A maior dificuldade está em sua remoção, pois, quanto mais viscosos forem os óleos minerais, mais difícil será sua remoção; os óleos graxos são os mais fáceis de remover.
- b) **Impurezas semissólidas** – as parafinas, as graxas, as ceras, os sabões e protetivos anticorrosivos comuns, não apresentam grandes dificuldades de remoção quando executadas por desengraxamento alcalino a quente e por processos de jateamento. Existem protetivos pesados de natureza altamente polar de difícil remoção que exigem a combinação de detergentes fortemente alcalinos com solventes orgânicos que pode trazer problemas de acabamento em fosfatização e eletrodeposição.
- c) **Impurezas sólidas** – são ocasionadas pela presença de massas de polimento, massas de estampagem e/ou de resíduos carbonáceos de películas parcialmente carbonizadas, sendo muito difícil sua retirada da superfície metálica, o que impede a utilização de processos de eletrodeposição por exigirem tratamento preliminar da superfície metálica.
- d) **Óxidos e produtos de corrosão** – são impurezas resultantes de tratamentos térmicos; a camada de óxido formada é difícil de ser removida.

2.3 Meios de remoção

Existem alguns excelentes métodos de remoção de impurezas metálicas. Esses meios de remoção surgem após serem identificados os tipos de impurezas presentes na superfície metálica. É preciso encontrar os adequados para removê-los. Os mais usados são: detergência, solubilização, ação química, ação mecânica.

Esses meios podem estar isolados ou em conjunto no processo de remoção.

Os fatores mais intervenientes são: a condição do estado inicial do material a ser tratado, resultados obtidos pós-tratamento, condições econômicas, equipamento disponível e outros.

2.3.1 Meios de remoção de impurezas metálicas

a) Detergência – sua finalidade é remover filmes e sujidade aderida à superfície metálica sem que existam reações diretas com o metal. Para formação de emulsões e solubilização, utiliza-se uma solução de limpeza alcalina que desengraxa a superfície, muitas vezes auxiliada por ação mecânica, por ar comprimido ou jateamento e/ou por circulação de bomba.

São muitas as variáveis para que ocorra a detergência. Estas vão desde a concentração, tempo, temperatura e agitação, de forma a colocar as impurezas em suspensão na solução de limpeza, pelo elevado potencial elétrico entre a solução de limpeza e a superfície metálica.

b) Solubilização – quando existem óleos de natureza simples ou graxos com baixo grau de contaminação, é possível utilizar solventes para a sua remoção que normalmente são hidrocarbonetos alifáticos, aromáticos, hidrocarbonetos clorados por cetonas, alcoóis e fenóis.

c) Ação química – no processo de decapagem, o objetivo é a utilização da ação destrutiva de certas substâncias de natureza ácida ou de natureza alcalina.

- **Decapagem ácida** – o objetivo é remover carepas de laminação, óxido ou outros compostos produzidos pela corrosão, porém, é preciso cuidado com a ativação química da superfície ou a possível fragilização por hidrogênio. Nesse caso, devem-se utilizar tensoativos (umectantes) e inibidores que devem ser totalmente removidos para não isolar o metal e prejudicar o processo posterior de fosfatização ou eletrodeposição.

- **Decapagem alcalina** – utilizam-se ácidos orgânicos, tais como ácido acético, oxálico, cítrico e glucônico, láctico, tartárico, com o objetivo de remover camadas de ferrugem de superfícies de aço, tornando complexo o ferro. Esses ácidos em meio básico, formam compostos de coordenação ou quelatos com os metais ferro, alumínio e cobre, sendo possível desengraxar e decapar simultaneamente sem ser preciso realizar o enxaguamento e o controle de pH após a decapagem alcalina.

Existem vários nomes de funções orgânicas no processo de remoção de impurezas. Essa será uma tarefa de pesquisa interessante para quem está estudando a disciplina Corrosão e Tratamento de Superfície.

Nesse momento é importante compreendermos que a grande vantagem da decapagem alcalina está em não provocar desgaste do metal e nem fragilização por hidrogênio, apresentando um baixo custo econômico, o que viabiliza a remoção de óxidos superficiais.

Normalmente a remoção de óxidos superficiais é utilizada junto com o processo de decapagem eletrolítica, onde o material metálico é colocado no cátodo, reduzindo ou eliminando os óxidos da superfície do material.

- d) **Ação mecânica** – seu principal fim é remover óxidos da superfície metálica pelo processo de abrasão até ficar limpa a superfície de impurezas. A ação pode ser manual ou mecanizada, ou seja, por jateamento mecânico.

Esse processo não ocasiona fragilização por hidrogênio e contaminação química de vapores, sendo de grande versatilidade no tratamento de diversos materiais.

O maior inconveniente é o custo do equipamento e os diversos tipos de abrasivo, utilizados (limalha, areia), além de não ser possível demorar muito tempo para se realizar o recobrimento da superfície jateada que recebe a tinta de fundo ou a chamada primer.

O tratamento da superfície normalmente é realizado através da fosfatização que retarda a corrosão, melhora a aderência, reduz o potencial de corrosão e elimina resíduos de ferrugem.

Durante a preparação de uma superfície metálica, é preciso atender ao grau mínimo recomendado por normas técnicas, criando um adequado perfil de rugosidade para permitir uma ancoragem mecânica da primeira demão da tinta de fundo na superfície metálica.

O perfil de rugosidade deve variar de 1/3 (um terço) a 1/4 (um quarto), dependendo da sua variação do tempo de intervalo entre a primeira demão e a segunda demão aplicada na superfície metálica.

Na preparação de superfície para pintura por limpeza mecânica, é fundamental a inspeção visual geral da superfície, seguindo os padrões da norma SIS 05 5900.

Devemos verificar a limpeza com solventes e a retirada de defeitos superficiais por esmerilhamento. Finalmente, devemos utilizar a ação mecânica manual ou com ferramentas manuais ou jateamento abrasivo.

A limpeza manual é ideal para a aplicação de tintas que não tenham boa adesividade ou que atuem pelo mecanismo de proteção catódica. É a limpeza que segue o padrão da norma St2 da norma SIS 05 5900.

As tintas à base de óleo são ótimas para esse tipo de limpeza de superfície.

A limpeza com ferramentas mecânicas manuais segue a norma SIS 05 5900, norma sueca, muito melhor do que a manual. Porém, é ainda precária, pois pode polir a superfície, dificultando a adesão da tinta na superfície a ser pintada.

Precisamos estabelecer critérios de análise para escolher tecnicamente os procedimentos a serem tomados para preparar uma superfície para pintura, ou revestimento.

Resumo

Nesta aula reconhecemos a importância das impurezas nas superfícies metálicas e seus efeitos intervenientes na qualidade dos protetores em diferentes processos anticorrosivos. Estudamos os diferentes processos e técnicas de remoção das impurezas na superfície metálica, para que sejam possíveis a análise e as aplicações de diferentes técnicas de revestimento anticorrosivo.



Atividades de aprendizagem

1. A(s) propriedade(s) das técnicas de proteção anticorrosivas mais importante(s) é(são):
 - a) Densidade e brilho da tinta.
 - b) Custo de aplicação.
 - c) Impermeabilização e diminuição de rugosidade superficial.
 - d) Iluminação da superfície.
 - e) Liberação de calor.
2. Estabeleça a diferença entre um veículo de tinta e seus pigmentos em termos de resistência.
3. Ao colocarmos aditivos em um sistema de pintura, estamos agregando à tinta elementos imprescindíveis que são:
 - a) Secantes.
 - b) Ésteres.
 - c) Solventes.
 - d) Óleos vegetais.
 - e) Nenhuma das respostas acima são elementos imprescindíveis.
4. Os pigmentos de um sistema de pintura melhoram as características físicas da película das tintas e se classificam em:
 - a) Antiespumantes e agentes tixotrópicos.
 - b) Anticorrosivos, opacificantes coloridos e cargas tintoriais.
 - c) Plastificantes e nivelantes.

- d)** Evaporantes e plastificantes.
 - e)** Todas as respostas acima estão corretas.
5. Assinale a alternativa que apresenta apenas mecanismos de proteção das tintas:
- a)** Barreira, inibição e secagem.
 - b)** Barreira, inibição, secagem e passivação anódica.
 - c)** Barreira, inibição e passivação catódica.
 - d)** Barreira, inibição e eletroquímico.
 - e)** Nenhuma das respostas acima.
6. O(s) material(is) que produz(em) proteção anódica é(são):
- a)** Pigmentos de zarcão, cromatos de zinco e fosfatos de zinco.
 - b)** Borracha clorada.
 - c)** Óleos vegetais.
 - d)** Óleos de linhaça.
 - e)** Sabão vegetal.
 - f)** Todas as respostas acima.
7. Os processos de pintura que podem ser utilizados para proteger superfícies metálicas são:
- a)** Processos de aquecimento e limpeza das superfícies.
 - b)** Processos de imersão, aspersão e aplicação à base de pós.
 - c)** Processos de borrachas cloradas.

- d)** Processos de jateamento e fosfatização.
- 8.** A sequência de procedimentos que se deve seguir para aplicar pintura em uma superfície metálica é:
- a)** Limpeza da superfície, aplicação da tinta e secagem.
 - b)** Limpeza da superfície, aplicação de primer, tinta intermediária e a aplicação de tinta de acabamento e secagem.
 - c)** Limpeza da superfície, aplicação de tinta de fundo, tinta intermediária e aplicação de tinta de acabamento.
 - d)** Limpeza e retirada de impurezas e restos de tinta, secagem e tinta de proteção.
- 9.** Baseando-se no princípio da proteção, para que um sistema de pintura tenha um bom desempenho, basta evitar:
- a)** Cantos vivos, áreas de estagnação, acúmulos de umidade e frestas.
 - b)** Tintas secas e rugosas.
 - c)** Tintas de acabamento.
 - d)** Vedar frestas e regiões de contato.
 - e)** Reduzir os números de poros da tinta.
- 10.** Citar alguns exemplos de tratamentos de proteção em revestimentos de alta espessura. Procure uma oficina de pintura de veículo e pergunte aos técnicos o que significa pintura ou revestimento de alta espessura. Com a resposta obtida faça suas observações.
- 11.** Os itens mais importantes no controle de qualidade de um sistema de pintura são:
- a)** Desuniformidade de espessura e bolhas.
 - b)** Desuniformidade de pintura e bolhas.

- c) Desuniformidade de espessura, bolhas, escorrimento, presença de casca de laranja, empoamento, fratura e descolamento.
- d) Desuniformidade de espessura, bolhas, escorrimento, presença de casca de laranja, empoamento, fratura e desformização de película.

Aula 3 – Meios corrosivos

Objetivos

Identificar e classificar os diferentes meios de corrosão.

3.1 Vamos refletir

Esta aula possibilitará a aprendizagem necessária para o aluno identificar os principais meios de corrosão que potencializam o processo corrosivo e suas relações de agressividade ante as diversas variáveis presentes no meio corrosivo.

3.2 Classificação geral dos meios de corrosão

No meio corrosivo, uma das grandes variáveis do processo de corrosão encontra-se nos meios reativos da atmosfera, nas águas naturais, no solo, em dejetos industriais, nos produtos químicos, nos alimentos, nos solventes orgânicos, nas madeiras e nos polímeros em geral.

A corrosão depende fundamentalmente das condições do meio eletrólito.

3.2.1 Meio que conduz a corrente elétrica na pilha eletroquímica

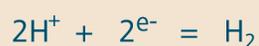
a) Se neutro e aerado:



b) Se neutro e não aerado:



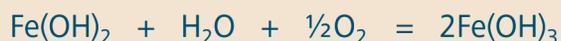
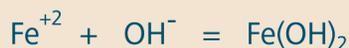
c) Se ácido e não aerado:



d) Se ácido e aerado:



e) No aço e ferro em geral:



3.2.2 Meios corrosivos

Atmosfera – tem sua ação corrosiva dependente da composição química, sendo constituída por substâncias poluentes que vão de partículas sólidas a gases, da variação de temperatura até a umidade relativa do ar e também do tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica, que poderá ser agravada pela intensidade e direção dos ventos e das variações climáticas em geral.

A atmosfera, segundo Shreir (1868), pode ser classificada em: atmosfera seca, atmosfera úmida, atmosfera molhada, atmosfera com poluentes sólidos, atmosfera com poluentes gasosos.

a) **Atmosfera seca** – é um tipo de atmosfera isenta de umidade, onde não existe nenhum filme de eletrólito na superfície do metal. Nesse meio, a oxidação do metal é lenta e seu produto de corrosão é resultante de reações químicas puras, afetando propriedades físicas e químicas.

Exemplo:

A prata ou o cobre, quando colocados em contato com o gás sulfídrico (H_2S) em presença de atmosfera seca, forma Ag_2S e CuS respectivamente, escurecendo ambas as substâncias.

b) **Atmosfera úmida** – um metal quando colocado em contato com a atmosfera que apresenta umidade relativa menor e não muito próxima de 100%, faz surgir um filme fino de eletrólito que se deposita na superfície metálica. A velocidade do processo corrosivo vai depender do grau dessa umidade relativa, da presença de poluentes atmosféricos e do grau de **higroscopicidade** dos produtos de corrosão presentes.

A-Z

higroscopicidade
Que tem tendência a absorver a umidade do ar.

- c) **Atmosfera molhada** – é o maior grau de umidade relativa, bem próximo de 100% ocorrendo a condensação na superfície do metal molhado exposto, dando a ideia de molhabilidade, devido à presença do eletrólito, tal como chuva e névoa salina depositadas na superfície metálica.
- d) **Atmosfera em presença de substâncias poluentes** – é a atmosfera que carrega partículas sólidas, sob forma de poeiras cuja heterogeneidade permite depositar material não metálico (SiO_2) capaz de criar condições de aeração diferencial, produzindo tipos de corrosão localizada abaixo do depósito. Ainda, se ocorrer deposição de substâncias higroscópicas, vão acelerar o processo corrosivo $\text{CaCl}_2 - \text{MgCl}_2$ e CaO .

Existem também depósitos de sais como $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e o sal NaCl , capazes de produzir eletrólitos fortes. Finalmente pode ocorrer a deposição de partículas metálicas de natureza eletroquímica diferente do material metálico exposto, formando inúmeras micropilhas que corroem o metal mais anódico.

A água do mar é altamente agressiva devido à presença de eletrólitos fortes, imprimindo um alto grau corrosivo à atmosfera marinha, pela presença de névoa salina que contém sais de NaCl e MgCl_2 .

Caso exista deposição de materiais sólidos inertes, pode ocorrer a retenção de gases na interface com a superfície metálica, agravando, caso esses gases sejam ativos. O exemplo pode ser representado pelo carvão, que reagindo com gás sulfuroso (SO_2), vai formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) ou ácido sulfuroso (H_2SO_3) de alta ação corrosiva.

- e) **Atmosfera com poluentes gasosos** – é um tipo de atmosfera carregada de gases ativos, tais como CO , CO_2 , SO_2 , SO_3 e NH_3 , normalmente produtos de combustão industrial oriundos da queima de combustíveis em geral. São gases muito agressivos ao elemento cobre e suas ligas que, quando corroídos, formam sulfetos de cobre preto (CuS), além de destruírem revestimentos com tintas à base de zarcão (Pb_3O_4) que ficam pretas pela formação do PbS . Os materiais responsáveis pelo escurecimento nesse meio são o sulfeto de prata ou Ag_2S .

Os gases de enxofre são os mais corrosivos da atmosfera industrial e, juntos à umidade residual, formam chuvas ácidas.

A atmosfera quando associada à umidade relativa do ar fica altamente agressiva em sua ação corrosiva, aumentando a taxa de corrosão de forma exponencial, logo, quanto mais poluída for a atmosfera, maior a taxa de corrosão, por consequência da chuva ácida.

Como podemos relacionar a umidade relativa do ar como variável de agressividade do processo corrosivo? A umidade relativa do ar é a relação entre o teor de vapor d'água encontrado no ar e o teor máximo que pode existir no mesmo dentro das condições consideradas. Existem autores que adotam ser a relação entre a pressão parcial de vapor d'água no ar e a pressão de vapor d'água saturado, na mesma temperatura, sendo expressa em porcentagem. Maior umidade relativa do ar, maior formação de chuva ácida e, por consequência, maior índice de corrosão.

Vários fatores se associam a uma variável produzindo maior agressividade no fenômeno de corrosão.

O ferro que, em baixa umidade, não sofre corrosão, na medida em que a umidade relativa cresce, o processo corrosivo vai aumentando até chegar ao nível de umidade crítica, onde a corrosão acelera. Se nessa atmosfera existir 0,01% de gás (SO_2), a corrosão aumenta sua taxa. Se ainda existirem depósitos de NaCl na superfície do ferro exposto, na medida que a umidade aumenta, a taxa de corrosão vai alcançar níveis elevados no mesmo número de dias de exposição do material.

A atmosfera pode ter fatores que aceleram ou inibem a sua ação corrosiva. Caso a temperatura seja alta, diminui a possibilidade de condensação de vapor d'água e de absorção de gases na superfície metálica.

Quanto menor for o tempo de exposição, menor será a ação corrosiva da atmosfera. A chuva pode ser um benefício quando consegue solubilizar os sais da superfície dos metais. Porém, se existirem frestas ou locais de estagnação, aumentam a atividade do eletrólito e a consequente taxa de corrosão.

As variações cíclicas de temperatura e umidade associadas às mudanças dos ventos são variáveis possíveis de serem utilizadas em nível de controle estatístico da taxa de corrosão em alguns países. Existem algumas classificações, porém, dentre todas, a mais correta é a que mostra a corrosão relativa do aço-carbono em função de alguns tipos de atmosferas.

Quadro 3.1: Corrosão relativa do aço-carbono

Atmosfera	Corrosão metálica (índice de agressividade)
Rural seca	1 a 9
Marinha	38
Industrial e marinha	50
Industrial	65
Industrial poluída	100

Fonte: Gentil, 1996

As águas naturais são meios que dependem da sua composição física, química e bacteriológica, cujas substâncias contaminantes vão desde a presença de gases dissolvidos, como O_2 – N_2 – NH_3 – SO_2 – SO_3 , até sais dissolvidos, como cloretos de sódio, cloreto de ferro, cloreto de magnésio, carbonatos de sódio, carbonatos ácidos de cálcio, carbonatos de magnésio e carbonatos de ferro.

As águas naturais podem conter matéria orgânica, bactérias, limos e algas, além de sólidos em suspensão, que, somados ao seu potencial hidrogeniônico (pH), podem acelerar, inibir ou diminuir a taxa de corrosão.

A temperatura e a velocidade de escoamento das águas naturais são fatores que devem ser apreciados na avaliação do caráter corrosivo.

O oxigênio, quando dissolvido na água, pode apresentar ação despolarizante que acelera o processo corrosivo, daí a necessidade de se realizar a desaeração da água utilizada em uma caldeira.

O oxigênio também traz uma ação apassivante em ligas de alumínio e de cromo, criando uma interface protetora contra a corrosão, devido à presença do Al_2O_3 e do Cr_2O_3 .

3.2.2.1 Existem sais que retardam o processo de corrosão?

Existem sais que, quando colocados em águas naturais, retardam o processo corrosivo. Os sais de $AlCl_3$ (cloreto de alumínio), $FeCl_3$ (cloreto de ferro), $MgCl_2$ (cloretos de magnésio), Na_2CO_3 (carbonatos de sódio) e $Al_2(SO_4)_3$ (sulfato de alumínio), sofrem hidrólise na água, formando meios ácidos e básicos que não aceleram a taxa de corrosão. Este é um dos motivos pelos quais se adiciona fosfato em águas de caldeiras. É preciso apenas ter cuidado, pois o meio básico para alguns metais é altamente agressivo. Exemplo: alumínio, zinco, chumbo e estanho.

A água dura é a que contém água, sais de cálcio e magnésio, ou seja, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$.

Com a água aquecida, os sais se decompõem em carbonatos de cálcio que, sendo insolúveis, serviriam como proteção contra o meio corrosivo. Existem sais tais como cromatos, nitritos, silicatos e polifosfatos, que quando dissolvidos em água natural, tornam-se inibidores de corrosão, sendo muito usados em águas de refrigeração.

3.2.2.2 Elementos presentes na água natural que a tornam corrosiva

- a) **Bactérias** – corrosão microbiológica.
- b) **Limos e algas** – queda de eficiência térmica e corrosão por aeração diferencial.
- c) **Sólidos em suspensão** – corrosão por aeração diferencial.
- d) **Água salinizada** – provoca rápido processo de corrosão eletroquímica e incrustações provenientes de organismos vegetais ou animais, aderindo à superfície metálica. É comum usarem-se toxinas ou tintas à base de óxidos, como o óxido de cobre (Cu_2O) ou então compostos de estanho para eliminar essas incrustações.

Essas variáveis têm o propósito de afetar a taxa de corrosão que sofre o efeito da velocidade de escoamento do eletrólito. Quanto maior for a velocidade do eletrólito, maior contato do oxigênio com a superfície do metal, podendo ocorrer a passivação e redução da taxa de corrosão inicial. Porém, no mar, não sofre a passivação pelo alto teor de íons cloreto.

Caso haja ação mecânica de erosão e alta velocidade do eletrólito, ocorre a união de variáveis aumentando, em consequência, a ação corrosiva e a ação erosiva.

O cuidado é que a temperatura tanto pode aumentar a corrosão, diminuindo a polarização, como pode diminuir a solubilidade do oxigênio e com isso retardar o processo de corrosão.

O solo tem grande importância no processo corrosivo pela sua natureza. É possível destacar fatores como porosidade que levam à aeração diferencial,

além da condutividade elétrica, sais dissolvidos que despolarizam ou inibem a corrosão.

Solo úmido e corrente de fuga causam grandes influências juntamente com as bactérias e com o potencial hidrogeniônico (pH).

A questão é conhecer o fator de maior importância entre porosidade e condutividade elétrica. Acredita-se que as correntes de fuga que podem surgir no solo são capazes de interferir nos processos de proteção e de produzir corrosão eletrolítica em tubulações enterradas.

Tratando-se de solo, existem bactérias que “comem” os revestimentos, acelerando a corrosão por excretação de ácidos orgânicos. Além disso, existem as bactérias que oxidam o enxofre e o sulfeto; outras reduzem o sulfato formando a corrosão microbiológica.

Se o solo for de natureza heterogênea, com diferentes características químicas, podem surgir pilhas de corrosão e se forem sujeitos a diferentes aerações produzem corrosão por aeração diferencial.

É importante observar que existem produtos químicos que podem se transformar em variáveis do meio no processo corrosivo.

Existem produtos químicos altamente corrosivos, com grau de complexidade maior, pelos inúmeros fatores que influenciam o meio: pureza do metal, elementos de natureza eletroquímica diferentes, tipo de superfície de contato, pureza do produto químico, concentração, temperatura e aeração.

Para se chegar ao nível de controle dessas variáveis, é necessário que se tenha acesso às várias tabelas e curvas de controle de concentração e potencial hidrogeniônico (pH), assim como às tabelas de potencial eletroquímico.

Os alimentos também são variáveis do meio corrosivo. Essas variáveis encontram-se estreitamente ligadas à formação de sais metálicos e dos ácidos orgânicos que servem como agentes conservantes capazes de produzirem corrosão metálica por *pites* e outros tipos de corrosão localizada.

As substâncias químicas metálicas fundidas são também consideradas variáveis do meio de corrosão. Quando essas substâncias se encontram na condição de variável do meio corrosivo, podem alterar ligas ou criar outras, formar

compostos intermetálicos, contaminação intergranular no metal sólido e efeitos de oxidação do metal fundido. O maior cuidado que se deve ter é nos banhos de sais fundidos, que retiram a camada de óxido por solubilização, deixando o material metálico sem proteção.

Conclui-se, portanto, que as substâncias químicas, de maneira geral, são variáveis de extrema importância na análise dos processos corrosivos.

Os solventes orgânicos, quando se apresentam como condição do meio corrosivo, não podem ser considerados um eletrólito por apresentar ligações covalentes, porém, as impurezas presentes são fatores de destaque no processo corrosivo. No entanto, soldagem, temperaturas, tensões mecânicas e aeração são variáveis agravantes da corrosão junto a esses meios.

Da mesma maneira podemos considerar que a madeira e os polímeros são meios que apresentam baixa incidência no processo corrosivo após a composição desses materiais. O ácido acético é o maior responsável pela ação corrosiva. No entanto, os tratamentos de preservação e os revestimentos aplicados podem apresentar múltiplas variáveis na ação corrosiva de alguns metais em contato galvânico.

O meio de corrosão tem sua importância refletida nas inúmeras situações de complexidade, pela necessidade frequente de se realizarem análises químicas com objetivo de identificar todos os elementos e substâncias presentes no meio corrosivo.

Por exemplo, podemos ter por processo de lixiviação de íons cobre contido em revestimentos, o que possibilita a corrosão de alumínio, zinco e aço. Os polímeros podem apresentar o desprendimento de íons halogenados, capazes de produzir ácidos, seja por reações químicas ou físicas (luz), pela decomposição, seja por liberarem substâncias tais como amônia (NH_3), tornando-se altamente corrosivas para o cobre e suas ligas.

O que queremos que seja entendido nessa aula é que o processo de corrosão metálica são as heterogeneidades responsáveis por processos de corrosão.

Em qualquer situação que ocorra diferença de potencial resultante de uma heterogeneidade entre qualquer material metálico e meio corrosivo, haverá a formação de áreas anódicas e áreas catódicas, surgindo a chamada corrosão eletroquímica.

Assim, vamos classificar algumas heterogeneidades quanto ao material metálico, que são: contorno de grão, tratamentos térmicos, polimento da superfície metálica, presença de escoriações e abrasões, bordas de superfície metálica, diferença de forma, deformações diferenciais e pré-exposições diferentes.

a) Contorno de grão – é possível se transformar em área anódica o grão que funciona como área catódica. O ataque corrosivo é então denominado de intergranular cujo fenômeno se dá como reação eletroquímica. Os defeitos e imperfeições no interior dos cristais podem gerar situações de heterogeneidades seletivas, pois em alguns casos ocorre a inversão eletroquímica.

São as orientações cristalográficas opostas ou de diferentes tamanhos de grãos que levam a situações de diferentes potenciais.

b) Tratamento térmico – qualquer falha de tratamento térmico que produza diferenças de propriedades na mesma superfície metálica, tem por consequência uma diferença de potencial entre essas regiões. É comum em soldagem metálica, onde a área anódica é próxima do cordão de solda em materiais similares, evidenciando-se em aços inoxidáveis e duralumínio (CuAl_2).

Caso um aço inoxidável ferrítico ou austenítico se encontrar em temperatura que o torne “sensitizado” ou “sensibilizado”, possibilita sua tendência à corrosão intergranular, reduzindo sua resistência mecânica.

Os aços inoxidáveis austeníticos ficam sensibilizados entre 400 e 900°C e os ferríticos em temperaturas próximas de 900°C. Porém, a extensão da sensibilização depende mais do teor de carbono no aço e do tempo de aquecimento do mesmo. Quando o aço fica sensitizado, ele praticamente não altera suas propriedades físicas. No entanto, quando ele entra em contato com o meio corrosivo, ocorre ataque nos contornos de grãos cuja velocidade de corrosão depende do grau de sensitização e do meio corrosivo.

Na soldagem, quando a temperatura ficar em torno de 1650°C e o aço inoxidável apresentar baixa condutividade térmica, surgirá um gradiente diferencial de temperatura no material. Onde ocorrer sensitização, ocorrerá precipitação de carbeto nos contornos de grãos, evidenciando a corrosão intergranular.

Em chapas de aço de espessuras bem finas e em soldagem de pontos, o resfriamento é rápido e, conseqüentemente, menos sensível à sensitização, pois quando o aço é sensitizado ocorrerá precipitação de carbeto, havendo destruição de passividade do aço nessa região e, em conseqüência, a formação de uma pilha ativa-passiva.

Nas ligas de duralumínio (CuAl_2) com 4% (quatro por cento) de cobre, ocorre a precipitação do alumineto de cobre nos contornos de grãos, tornando liga ou região anódica pelo decréscimo do teor de cobre na liga.

- c) **Polimento de superfície metálica** – é um tipo de heterogeneidade capaz de formar potenciais diferentes entre superfícies polidas e superfícies rugosas, devido aos efeitos de descontinuidade da superfície rugosa.
- d) **Escoriações e abrasões** – é um tipo de heterogeneidade que se percebe quando o material metálico em um meio corrosivo forma película com características protetoras e, se riscada, torna-se novamente anódica até a total destruição. É comum em luvas rosqueadas que, quando em contato com meios corrosivos, ficam anódicas em relação à tubulação catódica, surgindo pilhas ativas com grande intensidade corrosiva, devido à relação de a área anódica X catódica ser muito grande.
- e) **Bordas de superfície metálica** – podem surgir heterogeneidades capazes de produzir nessas regiões potenciais anódicos, principalmente quando as bordas são rugosas e desiguais, por cortes metálicos inadequados, sofrendo deformações a frio. Se colocadas em contato com o meio corrosivo, as bordas tornam-se anódicas ou catódicas.
- f) **Diferença de forma** – é um tipo de heterogeneidade oriunda de projetos industriais que possibilitam a formação de superfícies convexas, ideais para estabelecer sobretensões para o hidrogênio.
- g) **Deformações diferenciais** – esse tipo de heterogeneidade faz surgir diferentes potenciais pelos graus diferenciados de tensões ao longo de uma superfície metálica onde a região tensionada ou deformada funciona anodicamente.
- h) **Pré-exposições diferentes** – as superfícies metálicas parcialmente expostas ao ar, ao oxigênio, a água quente ou a meios que formam películas protetoras quando totalmente em contato com o meio corrosivo terão sua parte anódica não exposta previamente em relação à exposta.

3.3 Heterogeneidades dos meios de corrosão

As heterogeneidades do meio corrosivo se classificam em: aquecimento diferencial, iluminação diferencial, agitação diferencial, concentração diferencial, aeração diferencial.

- a) **Aquecimento diferencial** – é quando uma superfície metálica apresenta diferentes partes submetidas a diferentes gradientes de temperatura, surgindo a partir do aquecimento diferencial correntes de corrosão e consequentes pilhas termogalvânicas em áreas de temperaturas mais elevadas e anódicas.
- b) **Iluminação diferencial** – quando superfícies metálicas imersas em solução são iluminadas de forma diferenciada, podem ocorrer situações de potenciais diferentes onde a superfície mais iluminada se torna catódica e, se existir a ação de oxigênio dissolvido na solução, aumentará a ação da luz em alguns casos até se formarem películas protetoras.
- c) **Agitação diferencial** – se uma superfície metálica apresentar uma parte dela sob a ação de forte agitação de um líquido, pode ocasionar correntes de corrosão. Caso o líquido tenha aeração ou oxigênio seguido de agitação, podem ocorrer efeitos de aeração diferencial, pois o líquido agitado promove maior contato com a superfície metálica.

O ferro e o alumínio tornam-se anódicos nas regiões em contato com o líquido sem agitação, porém, prevalecendo o efeito de aeração diferencial. O cobre fica anódico nas regiões em que o líquido está mais agitado.

- d) **Concentração diferencial** – é um tipo de heterogeneidade em que ocorre corrosão eletroquímica devido à exposição de um material metálico em solução corrosiva com diferentes concentrações de íons. A região anódica ocorrerá onde houver menor concentração de íons metálicos.

Em superfícies metálicas superpostas, se existirem pequenas frestas possíveis de passar eletrólitos, ocorrerá corrosão por concentração diferencial, com formação de uma pilha chamada de corrosão por contato ou corrosão de fresta.

- e) **Aeração diferencial** – o material metálico fica imerso em áreas diferentemente aeradas, formando pilhas eletroquímicas de aeração diferencial ou pilhas de concentração anódica. A mais aerada se torna catódica, sendo um tipo de corrosão localizada, podendo surgir *pites* ou alvéolos.

Podem surgir pilhas de concentração iônica devidas à aeração diferencial. Seu efeito é maior nos metais menos ativos, como o cobre. A corrosão por aeração diferencial predomina no ferro e no zinco, no alumínio e no aço galvanizado em presença de umidade.

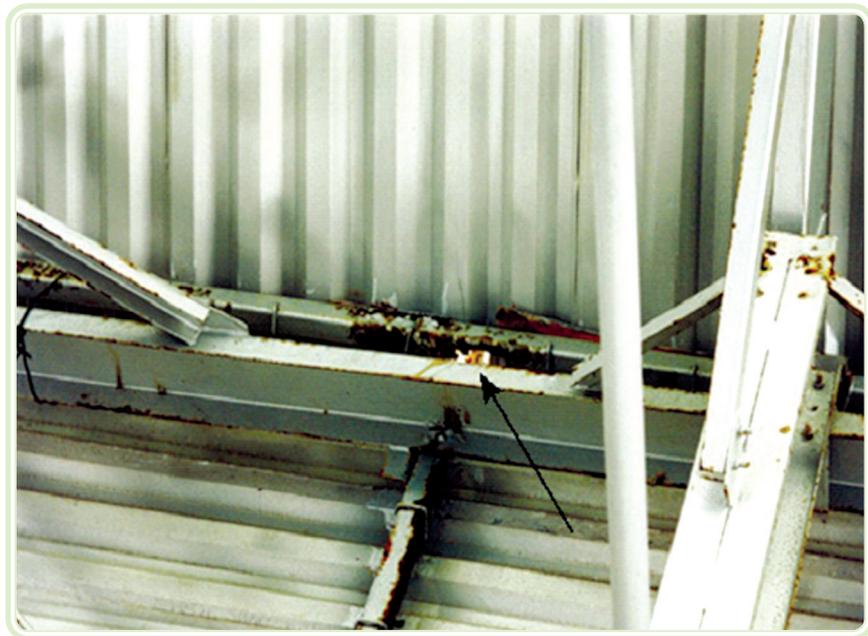
Resumo

Nesta aula estudaram-se os tipos de meios ou heterogeneidades existentes, como variáveis que intensificam o processo de corrosão na superfície metálica, e desenvolveram-se habilidades para reconhecer situações em que o material metálico precisa ser adequadamente preparado para minimizar as consequências dos efeitos de corrosão na superfície metálica.



Atividades de aprendizagem

1. Observe as imagens a seguir e analise o meio que elas sugerem. Após análise, faça a correlação.



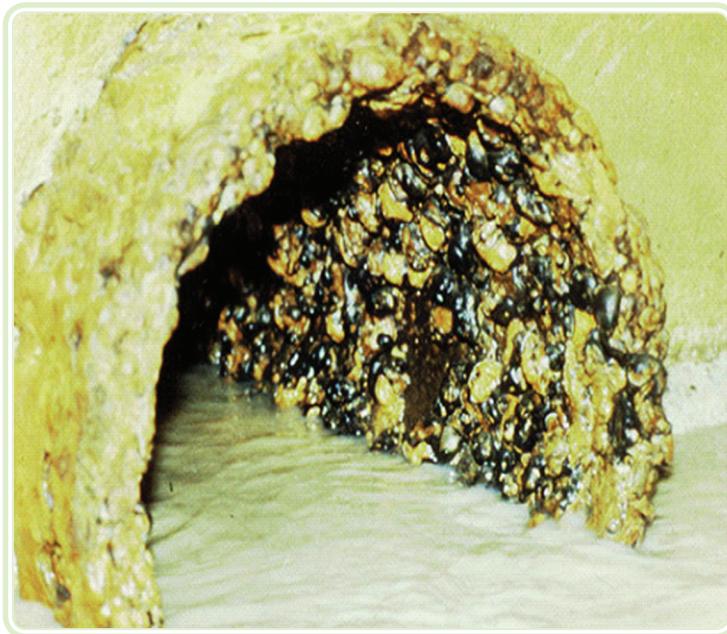
Exercício 1.1: Corrosão perforante em perfil em formato de U devida à deposição de ninho de passarinho

Fonte: Gentil, 1996



Exercício 1.2: Meio ambiente com poluentes atmosféricos: ácido clorídrico e traços de ácido fluorídrico

Fonte: Gentil, 1996



Exercício 1.3: Tubulação de água com tubérculos de óxidos de ferro

Fonte: Gentil, 1996

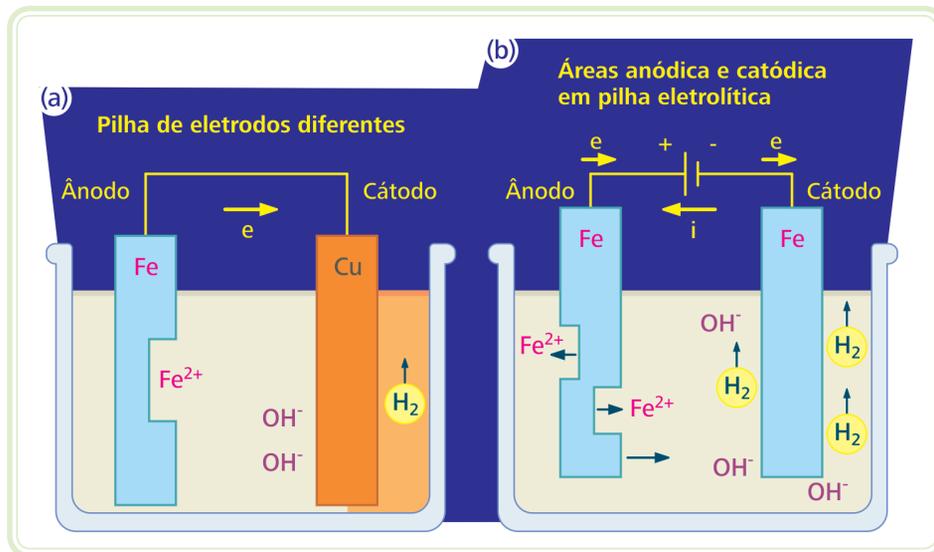


Exercício 1.4: Tubo de trocador de calor com depósitos

Fonte: Gentil, 1996

- | | |
|-------------------------------|--|
| (1) aquecimento diferencial | () quanto ao material metálico |
| (2) corrosão galvânica | () tratamento térmico |
| (3) deformação diferencial | () pré-exposição diferente |
| (4) contorno de grão | () meio corrosivo |
| (5) forma pilha eletroquímica | () aeração diferencial |
| (6) pintura | () materiais de potenciais diferentes |

2. Estabelecer a correlação com os diversos meios e elaborar as equações que ocorreriam no processo de corrosão. Por que o produto de corrosão seria $\text{Fe}(\text{OH})_2$?

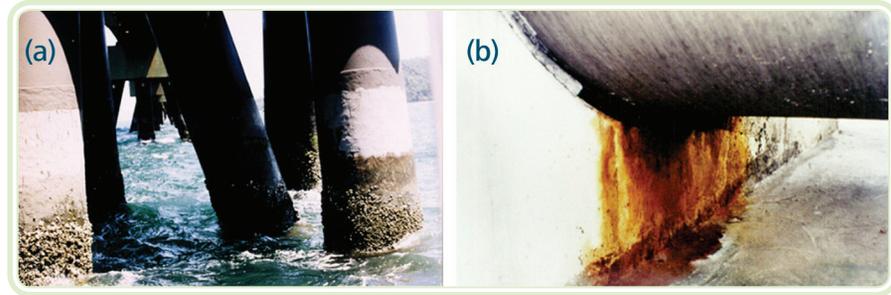


Exercício 2.1: (a) Áreas anódica e catódica na corrosão galvânica de ferro ligado a cobre e (b) áreas anódica e catódica na pilha eletrolítica

Fonte: CTISM, adaptado de Gentil, 1996

3. A corrosão ocorre na área de saída da corrente elétrica convencional, para o eletrólito
- se neutro e aerado.
 - se neutro e não aerado.
 - se ácido e não aerado.
 - se ácido e aerado.
4. Faça uma síntese de no máximo 20 linhas e coloque em discussão no fórum entre colegas os diferentes meios corrosivos e os principais prejuízos da chuva ácida das indústrias no processo corrosivo dos metais.

5. As imagens que seguem apresentam os meios que estão causando o processo corrosivo no material metálico. Identifique-os e assinale a alternativa correta:



Exercício 5.1: (a) Estacas protegidas com massa epóxi-poliamida, na faixa de variação de maré e zona de respingos, tinta de alcatrão de hulha-epóxi na área sujeita à névoa salina e proteção catódica por corrente impressa na parte submersa e (b) corrosão no tanque na área de apoio em base de concreto

Fonte: Gentil, 1996

- a) Fresta galvânica.
- b) Aeração diferencial; microbiológica.
- c) Microbiológica; névoa salina, fresta.
- d) Intersticial; fresta.
- e) Agitação diferencial; umidade excessiva.

Aula 4 – Revestimentos metálicos

Objetivos

Classificar os processos de revestimentos metálicos.

Aplicar diferentes técnicas de proteção da superfície metálica através de revestimentos metálicos.

4.1 Vamos refletir

Nesta aula serão abordadas possibilidades de redução da agressividade do meio sobre a superfície metálica, a começar pelos revestimentos metálicos cuja aprendizagem permitirá identificar os principais processos de revestimentos e descrever suas principais aplicações industriais.

4.2 Processos de revestimentos metálicos

Os revestimentos metálicos, além da finalidade decorativa, de resistência, de função elétrica e endurecimento superficial, servem para imprimir resistência ao processo corrosivo.

Ao se utilizarem metais nos revestimentos anticorrosivos, a ação protetora se explica pela formação de películas protetoras de óxidos, hidróxidos e outros compostos que reagem com os oxidantes do meio corrosivo, desde que ocorram formações de óxidos aderentes. Os mais comuns são o alumínio, o cromo, o níquel e o zinco.

O chumbo, o estanho, o zinco e o cádmio, são resistentes aos ácidos em meio não aerado.

É preciso que haja boa aderência e impermeabilidade da película e os revestimentos que possuem função catódica não devem formar pilhas galvânicas, como no caso do aço-carbono revestido com Sn – Cu – Pb – Ag e aço inoxidável, caso tenha função anódica. Esse revestimento protege o metal de base, sendo o ânodo da pilha, fato esse comum entre o aço-carbono e o ferro revestido com zinco e cádmio.

4.3 Aplicações de revestimentos metálicos

Os processos de aplicação com suas respectivas técnicas protetoras são:

- a) **Cladização** – também chamado de cladeamento, é feito por laminação conjunta a quente com chapa de metal base e metal de revestimento, ou então pelo processo de explosão. É muito comum o uso dessa técnica em aço-carbono e aço inoxidável ou em alumínio metálico com chapa de alumínio.
- b) **Imersão a quente** – muito utilizado no revestimento do aço com estanho, cobre, alumínio ou zinco. Imerge-se o material metálico em um banho do metal de revestimento fundido. O nome dos processos se deve ao tipo de revestimento: aluminização, estanhagem, *copperweld*, galvanização ou zincagem.

Na aluminização, é o alumínio que reveste o aço-carbono e a estanhagem é a liga de chumbo-estanho no aço, no entanto, segundo Gentil (1996), esta é uma liga que produz um tipo particular de estanhagem, que são as chapas "*terneplates*", não esquecendo que a estanhagem pode ser produzida com a utilização do estanho apenas como recobrimento.

Existe processo de tratamento denominado de *copperweld*, sendo o aço revestido com o metal cobre e quando o aço é revestido com o metal zinco o processo é denominado de galvanização ou zincagem à quente, de grande utilização e versatilidade devido a grande resistência à corrosão.

- c) **Metalização** – é um processo com fins de recuperação, que utiliza metalização com zinco, estanho, chumbo, cobre, cromo, níquel e ainda ligas de cobre e zinco, aço inoxidável e outros. Esses processos sempre ocorrem com a utilização de pistolas próprias de aplicação e com o uso de oxi-acetilênico onde o fio de metal de revestimento se deposita na superfície do metal a ser protegido.

Existem outros processos de metalização, com arco elétrico e plasma, usando gás inerte. O metal de revestimento usado é em forma de pó cujas variáveis de proteção dependem da qualidade do metal, da umidade, do preparo da superfície e da temperatura, para que haja aderência do revestimento.

- d) **Eletrodeposição** – processo muito utilizado pela melhor qualidade de revestimento livre de poros e de camadas contínuas e finas com alto grau

de proteção. É comum o uso de zinco, cromo, cádmio, níquel, liga de cobre-prata e até ouro, onde o metal usado no revestimento é o ânodo, podendo ser o próprio metal a ser depositado. O uso de eletrólito com sal do mesmo metal é comum em cubas eletrolíticas, considerando a existência de importantes variáveis no processo como: densidade a ser aplicada, concentração do eletrólito, temperatura do banho, aditivos e a natureza dos cátodos e ânodos.

- e) **Cementação** – é muito utilizado para revestimento com alumínio e zinco, sendo difundido na superfície do material metálico. É um processo que tem nomes distintos: calorização quando feito pelo alumínio e sherardização quando feito pelo zinco. É usado em peças de pequeno volume como parafusos, porcas e niples.
- f) **Deposição em fase gasosa** – é um processo complexo usado para revestir superfícies com ligas de cromo, ferro, tungstênio e molibdênio, através de decomposição térmica.
- g) **Redução química** – é um processo em que ocorrem precipitações do metal formando uma película muito aderente na superfície metálica, aplicadas normalmente pela redução de íons metálicos presentes em soluções. É um processo usado para revestir formas complicadas e interiores de tubos cujo acesso é difícil.

Resumo

Nesta aula estudamos as diferentes técnicas de aplicação de revestimentos metálicos para minimizar os efeitos da agressividade do meio corrosivo sobre a superfície metálica.

Atividades de aprendizagem

1. Faça uma pesquisa sobre a relação custo benefício entre os diferentes tipos de aplicação de revestimentos metálicos, identificando as situações em que é possível sua aplicação.



Aula 5 – Revestimentos não metálicos inorgânicos

Objetivos

Identificar e classificar os processos de revestimentos não metálicos.

Aplicar técnicas de tratamento de superfícies metálicas através do uso de revestimentos não metálicos inorgânicos.

5.1 Vamos refletir

Nesta aula serão abordadas as possibilidades de redução da agressividade do meio sobre a superfície metálica. Assim como o estudo dos revestimentos metálicos, o dos não metálicos inorgânicos permitirá identificar os principais processos de revestimentos e descrever suas aplicações industriais.

5.2 Processos de revestimentos não metálicos

Os compostos inorgânicos, ao serem depositados diretamente na superfície como esmaltes vitrosos, vidros, porcelanas, cimentos, óxidos, carbetos, nitretos, boretos e silicetos são, segundo suas características particulares, processos de proteção onde cada caso e situações corrosivas devem ser analisados. Os mais utilizados processos de proteção por revestimentos não metálicos inorgânicos são a anodização, a cromatização e a fosfatização.

O PbSO_4 e o CaF_2 , sendo ambos sais insolúveis, vão proteger o metal de uma possível ação do ácido sulfúrico.

Os materiais cerâmicos são aplicados por plasma e quando misturados ao metal em pó, resistem à corrosão e à intensa abrasão. Os cimentos e porcelanas protegem da água salgada, sendo resistentes em meios alcalinos e a alguns ácidos.

5.3 Aplicações de revestimentos não metálicos

a) **Anodização** – a proteção é caracterizada pela aderência e pela alta resistividade elétrica, por isso a utilização do alumínio é excelente para resistir à corrosão atmosférica. O Al_2O_3 é obtido por oxidação química ou eletrolítica, chamada de anodização. O material metálico é o ânodo, logo é possível se controlar a espessura de camada de óxido a ser obtida com baixa elasticidade e grande resistência à corrosão e ao desgaste mecânico.

O alumínio na forma de trióxido de alumínio ou alumina, é excelente para receber pigmentações corantes. Existem alumínios anodizados pretos, azuis, vermelhos e prateados, além de outros. No entanto, após a anodização, como a alumina é porosa, é preciso realizar a selagem ou (*sealing*) para vedar os poros formados, tornando-a mais resistente à névoa salina. Esse processo se faz pelo aquecimento em vapor d'água sob pressão ou em soluções de dicromato de potássio por um determinado tempo.

b) **Cromatização** – é quando se obtém um revestimento protetor produzido em soluções contendo cromatos ou ácido crômico, com objetivo de aumentar a resistência à corrosão e de melhorar a aderência das tintas sobre os materiais metálicos, tais como alumínio ou ligas de alumínio.

É um processo que pode ser feito em meio ácido ou básico em baixas temperaturas, sendo muito rápido e eficiente, seja por jateamento (*spray*) ou por imersão, para em seguida ser lavado e seco. O alumínio, o magnésio, o zinco, o cádmio, o estanho, o cobre prata, o aço e as ligas de titânio e zircônio, possuem propriedades que facilitam a absorção de corantes.

c) **Fosfatização** – existe uma grande versatilidade de aplicação, principalmente no ferro, zinco, alumínio, cádmio e magnésio. Possui grande resistência à névoa salina e, quando a superfície recebe a pintura posterior, é resistente à corrosão.

É um processo antigo que merece pesquisa, pois apresenta possibilidades de estudo em suas reações de formação de fosfato, insolúveis sobre superfícies metálicas. O banho é realizado à temperatura ambiente e quase insensível a outros íons que possam estar presentes.

Quando se fosfatiza um metal, o banho fosfatizante produz corrosão primária, onde o fosfato primário produzido é solúvel, seguido de fosfatos secundários e terciários insolúveis ($FeHPO_4$), que se depositam sob a forma de cristais.

É possível se fosfatizarem superfícies galvanizadas e zinco metálico com banhos de fosfato de manganês, porém no alumínio, pode precipitar o fosfato de alumínio, o que é nocivo para o processo.

Resumo

Nesta aula estudamos as diferentes técnicas de aplicação de revestimentos não metálicos para minimizar os efeitos da agressividade do meio corrosivo sobre a superfície metálica.

Atividades de aprendizagem

1. Faça uma pesquisa sobre a relação custo benefício entre os diferentes tipos de aplicação de revestimentos não metálicos, identificando as situações em que é possível sua aplicação. Compare com as diferentes formas de aplicação de revestimentos metálicos.



Aula 6 – Tintas e polímeros

Objetivos

Identificar e classificar as tintas e seus elementos constituintes.

Classificar os diferentes mecanismos de proteção.

Classificar e identificar os diferentes sistemas de pintura.

6.1 Vamos refletir

Nesta aula serão abordadas as possibilidades de redução da agressividade do meio sobre a superfície metálica pelo conhecimento sobre pinturas e polímeros. Para isso, serão necessários conhecimentos básicos sobre os principais sistemas de pintura, sobre os mecanismos de proteção e sobre os princípios de formação de películas no processo de pintura e proteção de superfícies metálicas.

6.2 Tintas

As tintas são revestimentos não metálicos de natureza orgânica. É o método convencional mais utilizado no combate à corrosão pelo baixo custo e fácil aplicação. No entanto, existem pinturas industriais como as pinturas eletroforética e eletrostática que superam algumas das limitações desse processo anticorrosivo pela qualidade de aplicação e pela relação custo-benefício, além de atenderem a outras expectativas de quem as utiliza.

Como se pode observar na Figura 6.1, os sistemas de pinturas sofrem deterioração em virtude da agressividade do meio.

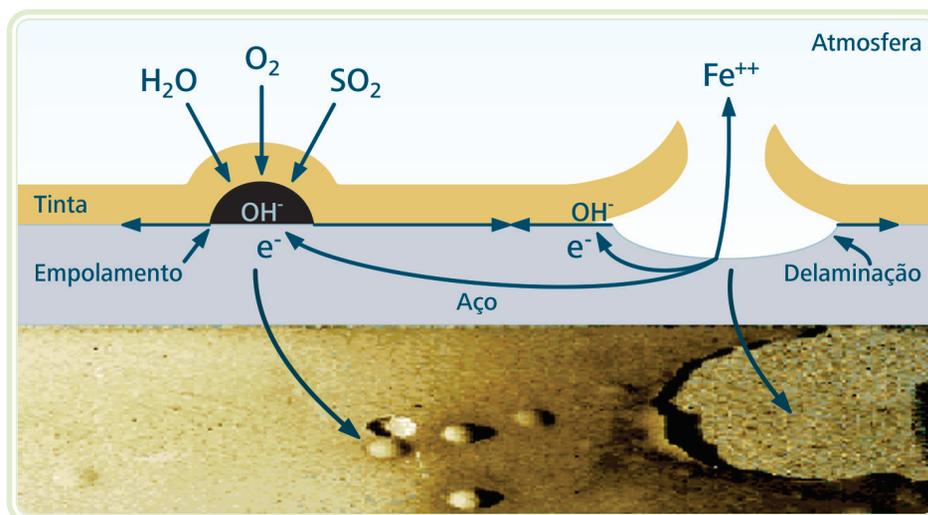


Figura 6.1: Sistemas de pintura e o meio ambiente

Fonte: Pannoni, 2008

6.2.1 Tintas e seus constituintes

- Os veículos e os pigmentos.
- Os veículos podem ser voláteis e não voláteis.
- Os veículos podem ser conversíveis ou inconversíveis.
- Os pigmentos servem como cargas. Podem ser tintoriais ou anticorrosivos.
- Os veículos voláteis podem ser solventes, falsos solventes ou diluentes.

6.2.2 Síntese conceitual dos constituintes das tintas

Veículos – parte líquida da tinta cuja função é a formação de películas.

Verniz – é o veículo sem pigmentos.

Veículos não voláteis (VNV) – parte sólida do veículo cuja função é impermeabilizar a superfície e aglutinar pigmentos, além de conferir plasticidade à película. São as resinas, polímeros, óleos secativos.

Veículos não voláteis conversíveis (VNVC) – caso ocorra polimerização do VNV com evaporação do solvente, coincidentemente, haverá oxidação ou condensação do veículo.

Veículos não voláteis inconversíveis (VNV) – caso ocorra evaporação do solvente sem modificações estruturais.

Veículos voláteis (VV) – servem para solubilizar ou baixar a viscosidade dos VNV, retardando ou acelerando a polimerização e melhorando sua aplicação.

Solvente – nos VV é a parte que solubiliza o VNV, ajustando a viscosidade da tinta e facilitando sua aplicação.

Falso solvente – é a substância com baixo poder de solvência junto a VNV, servindo apenas para reduzir custos e ajustar a cura da tinta.

Diluyente – é um VV que não solubiliza o VNV, porém, quando adicionado à tinta, serve para baixar a viscosidade e ajustar o tempo de cura.

Aditivos – são colocados na tinta para melhorar a qualidade da película. Quando se colocam sabões de ácidos graxos, eles têm a função antissedimentantes. Ao se adicionarem naftenatos ou linoleatos de chumbo, cobalto, manganês ou cálcio, têm a função de secantes, formando películas por oxidação.

Os fosfatos orgânicos são plastificantes. Os antioxidantes evitam a oxidação da tinta quando a lata for aberta. Usando sais orgânicos de mercúrio, evita-se a presença de fungos e se coloca óxido cuproso ou compostos de estanho que evitam o incrustamento em cascos de navios.

Pigmentos – são substâncias sólidas quase insolúveis que ficam dispersas nos veículos, servindo de proteção anticorrosiva. Melhoram a cor e as características mecânicas das películas. Caso eles sejam solúveis, são chamados de corantes. As cargas apresentam muitos fins que vão do baixo custo ao aumento do rendimento, conferindo características distintas entre os vários tipos de veículos.

6.2.3 Mecanismos que produzem barreiras, inibição ou mecanismos eletroquímicos

Barreira – quando se coloca uma película altamente impermeável entre a base e o meio corrosivo, conferindo grande resistência que abaixe a corrente de corrosão a níveis desprezíveis. Porém, com o tempo, a película é vencida pelo eletrólito e, a partir daí, o processo corrosivo se instala dando início à corrosão.

Inibição – se forem colocados pigmentos inibidores de corrosão junto à barreira por sua solubilidade, eles penetrarão pela película formando uma

camada passivante sobre a superfície metálica, evitando que o metal passe para a condição iônica e impedindo a reação anódica ou catódica.

Eletroquímico – quando se coloca metal com características anódicas em relação ao metal a ser protegido, a exemplo do metal zinco que, quando disperso em resina, epóxi ou em silicatos inorgânicos ou orgânicos, possui a propriedade de conferir proteção catódica ao aço.

6.3 Mecanismos de proteção

Quando se fala em sistema, significa o conjunto de operações que são realizadas para a aplicação de um revestimento à base de tintas, abrangendo desde o preparo e o condicionamento da superfície até a aplicação de tinta propriamente dita, no acabamento final.

Os processos de pintura podem ser por imersão simples ou eletroforética, por aspersão, a trincha e a rolo. A imersão simples é pelo banho de tinta, e a imersão eletroforética é por polarização em banho de tinta. A aspersão é feita através de ar comprimido, podendo ser simples (convencional) ou a quente (alta viscosidade), sem ar, com pressões elevadas enquanto a aspersão eletrostática (ddp), ou seja, por diferença de potencial e finalmente o processo a rolo utilizado para grandes áreas.

Não existem mais aplicações de proteção através de processos de pintura com uso de trinchas, em vista da grande perda de qualidade e estética.

É preciso que uma superfície seja isenta de ferrugem ou de outros tipos de óxidos, de sais solúveis, de poeira, de óleos e graxas, de restos de pintura e de umidade, sem contar que não deve haver a presença de produtos químicos e de carepa de laminação.

Como conseguir uma superfície com ausência total de impurezas? É impossível que exista ausência total de impurezas, no entanto, qualquer superfície carregada de impurezas, é possibilidade de prejuízos do processo de pintura e do sistema de pintura realizado.

6.3.1 Passo a passo da aplicação de pintura

Primeiro, deve-se limpar a superfície metálica para depois aplicar a tinta de fundo ou primer, podendo ser uma ou duas demãos aplicadas sobre a superfície. Sua função principal é anticorrosiva. Em seguida, deve-se aplicar pintura de

acabamento com uma ou mais barreiras entre o eletrólito e a tinta de fundo, cujo fim principal é a impermeabilidade e a espessura de películas aplicadas, considerando o tipo de atmosfera a que a superfície está exposta.

Na escolha do sistema ideal de pintura, é preciso não generalizar. Deve-se procurar as variáveis capazes de caracterizar um tipo determinado de ambiente que considere as múltiplas formas de aplicação do revestimento.

6.4 Sistemas de pinturas

a) Sistemas rurais – são sistemas menos agressivos que admitem limpeza mecânica ou jateamento comercial. As tintas de fundo podem ser à base de zarcão, óleo de linhaça ou alquídica/zarcão.

As bases de óxido de ferro são aceitáveis. A espessura da película por aplicação varia de 30 a 40 micrometros (μm), em uma ou duas demãos no máximo. Os revestimentos de acabamento podem ser à base de esmaltes alquídicos ou óleos fenólicos, em duas ou mais demãos na faixa de 25 a 35 μm a cada aplicação. São sistemas que apresentam excelentes resultados em equipamentos industriais.

b) Sistemas pouco agressivos – são os utilizados em regiões urbanas pouco industrializadas, afastadas da orla marítima. É preciso que as superfícies sejam tratadas por processos de jateamento e o primer seja de duas demãos de tintas alquídicas e óxido de ferro, podendo alcançar até 40 μm de espessura por película. Nesse sistema, o acabamento pode ser à base de esmalte alquídico com duas demãos, com espessura de películas que varia de 25 a 35 μm por demão.

c) Sistemas poluídos industrialmente – são os utilizados onde existe quantidade grande de indústrias que diversificam o uso de produtos de combustão e ataques ácidos ou alcalis e que produzem altos e complexos processos corrosivos.

A superfície deve ser jateada quase ao branco. Aplica-se esmalte alquídico/zarcão até o nível de épxi pigmentado com zarcão e óxido de ferro como pintura de fundo, sempre com duas demãos e com espessura de 25 a 35 μm . As pinturas de acabamento podem ser em esmalte alquídico, alumínio fenólico ou esmalte acrílico com duas demãos de espessura que varia de 20 a 30 μm por demão.

- d) Sistemas de alta umidade** – neste caso é preciso que a superfície seja jateada quase ao branco, com primer de ferro-borracha clorada e com 20 a 35 μm por demão, aplicando borracha clorada não saponificável como acabamento em duas demãos com 25 a 35 μm em cada demão.
- e) Sistemas marinhos** – são os que protegem de constantes ataques de alta umidade e sais. É necessário que a superfície seja jateada ao metal quase branco e que as tintas de fundo sejam à base de epóxi de alta espessura pigmentada com óxido de ferro ou zarcão misto, em espessura de 100 a 150 μm , ou podem-se aplicar duas demãos de silicato inorgânico de zinco ou silicato de etila. Nesse caso, o revestimento de acabamento deve ser em borracha clorada ou em esmalte epóxi de alta espessura em duas demãos.
- f) Sistemas de estruturas imersas** – utilizado sem ambientes de múltiplas variáveis e agentes de agressividade. É necessário estudo mais profundo do ambiente, preparo de superfície adequado a cada caso com jateamento, para em seguida, aplicar revestimentos à base de zinco, de alcatrão-epóxi, considerando o grau de proteção a ser obtido, e a relação de custo benefício, via lucro cessante.
- g) Sistemas de estruturas a temperaturas elevadas** – acima de 120°C até 600°C, é preciso aplicar alumínio silicone, tinta que somente forma película aderente acima de 300°C. Pode-se também aplicar silicato inorgânico de zinco para temperatura próxima a 500°C. Nesses casos, é preciso que a superfície seja tratada por jateamento abrasivo ao metal branco.
- h) Sistemas abrasivos** – são os utilizados em ambientes de constantes choques de areia e de ventos fortes. É necessário que a superfície seja jateada ao metal branco e receba duas demãos de silicato inorgânico de zinco em espessuras de 70 a 100 μm a cada demão aplicada.
- i) Sistemas químicos** – quando a superfície tem contato ácido, é preciso ser jateada ao metal branco, receber duas demãos de esmalte epóxi de alta espessura e, em seguida, a aplicação de três demãos de borracha clorada não saponificável. Em contato com sistemas alcalinos, aplica-se esmalte epóxi de alta espessura por demão.

Vamos refletir sobre polímeros. Quando existem equipamentos em contato com meios altamente agressivos, passíveis de rápida corrosão, a utilização de polímeros é alternativa de revestimento ou como material contido no próprio equipamento.

São elastômeros artificiais, silicone, ebonite, plástico do tipo teflon, polietileno, cloreto de polivinila (PVC) e polipropileno.

A vantagem do uso de elastômeros está na resistência a produtos químicos, a despejos industriais, no baixo peso, na fácil instalação, na resistência a solos e a agentes corrosivos, além de dispensarem revestimentos por pintura. São atóxicos.

A maior limitação dos polímeros é a sua baixa resistência a solventes e à temperatura, com exceção dos polímeros inorgânicos, desde que não sejam termoplásticos.

O fluorcarbeto teflon é excelente para resistir a temperaturas até 300°C, sendo inerte em ácidos e soluções cáusticas, além de não ser afetado pela maioria dos ácidos orgânicos. Porém, não resiste a metais alcalinos fundidos, flúor e a agentes fluoretantes.

Quando estamos falando de polímeros, o plástico é o mais comum e muito utilizado em revestimentos de aço e estruturas, concreto, tubulações e tanques em contatos com ácidos altamente corrosivos.

Resumo

Nesta aula apresentaram-se os principais conceitos dos diferentes sistemas de pintura e de suas formas e técnicas de aplicação como auxiliar no tratamento anticorrosivo das superfícies metálicas, identificando suas limitações e vantagens industriais frente aos meios de corrosão e suas variáveis de agressividade. Identificaram-se os elementos constituintes das tintas e as relações entre diferentes processos de pintura e seus principais mecanismos de proteção metálica.

Atividades de aprendizagem

1. Que tal começarmos a pensar em um projeto de proteção de uma superfície metálica industrial: Vamos oferecer algumas sugestões: O exemplo proposto seria o uso de um transformador de alta tensão, sob utilização em meios industriais altamente agressivos, escolhendo um sistema de pintura capaz de proteger contra a corrosão metálica. Primeiro, é preciso justificar o processo de pintura escolhido no tratamento de proteção e a aplicação da proteção catódica na superfície metálica.



Aula 7 – Proteção catódica

Objetivos

Selecionar técnicas de proteção que utilizem a proteção catódica por corrente impressa ou por ânodo de sacrifícios.

Aplicar cálculos para a obtenção da corrente de proteção para escolha do método de proteção catódica através de relações custo-benefício em superfícies metálicas.

7.1 Vamos refletir

Nas aulas anteriores ofereceu-se uma dinâmica de opções sobre a proteção da superfície metálica frente aos meios corrosivos e suas variáveis. Pôde-se analisar o uso de revestimentos metálicos, não metálicos ou a utilização de revestimentos através de sistemas de pinturas.

7.2 Mecanismos e métodos de proteção

Todos os processos de proteção apresentam sua eficiência sob as condições preestabelecidas de custos e benefícios. Em nível industrial, são excelentes para inibição da agressividade do meio corrosivo sobre a superfície metálica. Vamos apontar um dos processos muito utilizados na proteção de superfícies metálicas que é a proteção catódica.

O conteúdo desta aula permitirá identificar os mecanismos de funcionamento da proteção catódica, caracterizar os principais métodos de proteção catódica e selecionar sua aplicação no processo de corrosão metálica.

A teoria será mesclada com a prática de laboratório e deverá embasar o fazer profissional.

Lembramos que existem muitas formas de proteção anticorrosiva, no entanto, a catódica vem se sobressaindo nos projetos de proteção contra a corrosão de instalações industriais, de equipamentos e de estruturas metálicas em geral, sejam enterradas, submersas ou em contato com eletrólitos. Podemos citar

os gasodutos, oleodutos e tubulações que transportam petróleo, produtos químicos, adutoras, redes de água, *piers* de atracação de navios, cortinas metálicas e estacas de fundações.

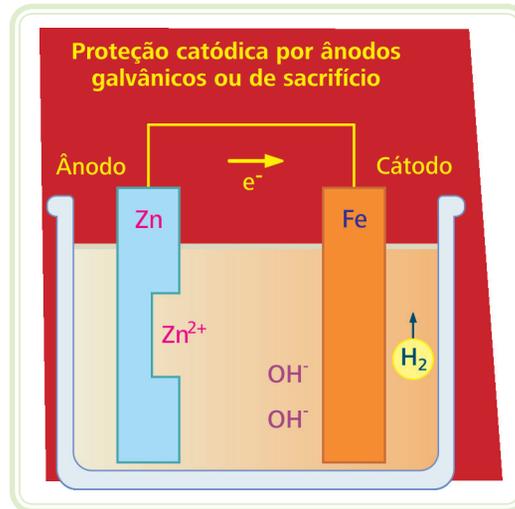


Figura 7.1: Proteção catódica por ânodos de sacrifícios

Fonte: Gentil, 1996

A proteção catódica reduz a valores desprezíveis a velocidade de corrosão por longo tempo sem a necessidade real do revestimento, independentemente da agressividade do meio, além de tornar menos frequente a necessidade de verificação de sua eficiência.

É necessário utilizar o sistema de pintura quando utilizamos a proteção catódica?

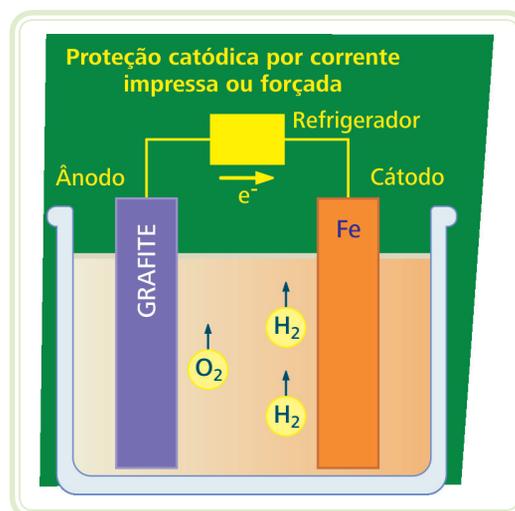


Figura 7.2: Proteção catódica por corrente impressa

Fonte: Gentil, 1996

Um processo de proteção não anula a utilização do outro. É claro que, se utilizarmos algum tipo de revestimento na estrutura protegida catodicamente, a eficiência é quase absoluta, dependendo das possíveis variáveis capazes de surgir.

É muito simples a sua utilização, porém, é preciso que exista certa experiência do projetista em instalações e nos cálculos da corrente de proteção. Trabalharemos com áreas anódica e catódica no processo corrosivo, existindo fluxo de elétrons da área anódica para a área catódica, via eletrólito, de forma que o retorno dessas correntes elétricas aconteça pelo contato metálico entre as regiões anódicas e catódicas.

É fundamental que o projetista tenha experiência nas áreas de eletrotécnica, química e mecânica juntamente com o metalurgista, porque essas experiências formam o caráter multidisciplinar.

É preciso que compreendamos o fenômeno da corrosão e seus principais mecanismos de proteção.

A diferença de potencial (ddp) vai surgir ao longo da superfície metálica no meio corrosivo, por vários fatores como: variação da composição química do metal, inclusões não metálicas, tensões internas diferentes, descontinuidades de soldagem e tratamentos térmicos.

É preciso analisar o mais corretamente possível o potencial de corrosão da superfície a ser protegida.

As heterogeneidades do solo vão agravando os problemas de corrosão, além de variações de resistividade elétrica do solo, grau de aeração, grau de umidade que produzem pilhas de corrosão com graus de severidade. A região anódica é onde há mais baixa resistividade, zona menos aerada. A Figura 7.3 representa um esquema de tubulação de aço enterrada no solo.

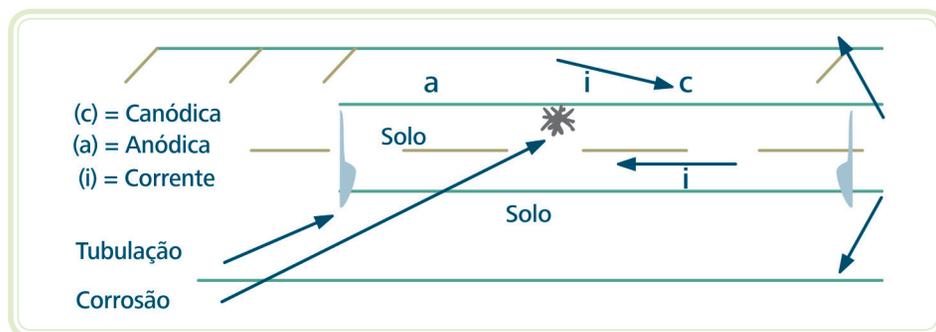


Figura 7.3: Esquema de tubulação de aço enterrada no solo

Fonte: Oliveira, 2008

A taxa de corrosão depende da intensidade da corrente gerada e que flui no sistema. Essa intensidade de corrente vai depender das várias resistências ôhmicas e não ôhmicas do circuito e da força eletromotriz total da pilha formada.

O mecanismo de proteção visa eliminar as áreas anódicas da superfície do metal de forma que toda a superfície protegida possa se tornar catódica.

Quando é estabelecido um circuito onde um bloco metálico imerso em um eletrólito que, carregado com uma força eletromotriz, cujo polo positivo ligado a esse bloco e o polo negativo ligado a dois blocos, vai torná-los cada vez mais negativos, fazendo-os funcionar como cátodos.

Ora, conseqüentemente, quem cede elétrons fica anódico e quem os recebe fica protegido da corrosão.

Logo, ao se aplicar o processo catódico de proteção, vão existir três mecanismos que são possíveis de reduzir a corrosão. São eles:

- Momento em que o potencial do metal atinge um valor capaz de proteger toda a área do metal sob proteção catódica.
- Quando o eletrólito em contato com o metal se torna mais básico devido à redução de íons hidrogênio (H^+), impedindo a reação anódica ou então, pela redução do oxigênio, aumentando o valor do pH pela formação de íons (OH^-), inibindo a corrosão.
- Quando a elevação do pH acarreta a precipitação de substâncias insolúveis, tais como $CaCO_3$, $Mg(OH)_2$ que, ao se precipitarem depositam-se no metal formando camadas protetoras. Observe a Figura 7.4.

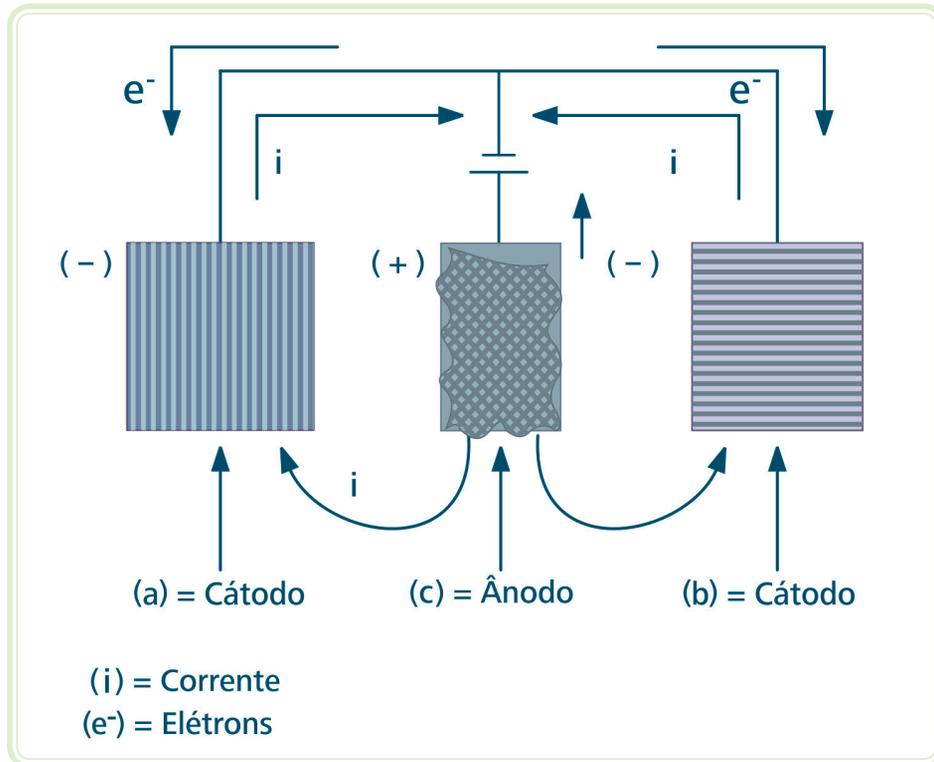


Figura 7.4: Esquema de proteção catódica

Fonte: Oliveira, 2008

7.2.1 Métodos de proteção catódica

Vamos utilizar dois métodos embora ambos apresentem o mesmo princípio de funcionamento, ou seja, colocar corrente elétrica na estrutura a ser protegida através do eletrólito.

Proteção catódica galvânica ou por ânodos galvânicos ou chamados de ânodos de sacrifício.

7.2.1.1 Proteção catódica por corrente impressa ou forçada

Proteção catódica galvânica – o método se baseia na aplicação de um fluxo de corrente que se origina da diferença de potencial (ddp) existente entre o metal a ser protegido e o metal escolhido como ânodo que ocupará um potencial mais elevado.

Existe uma tabela de potenciais que possui uma série galvânica prática e os ânodos mais utilizados: liga de magnésio, zinco ou alumínio, cujas exigências técnicas são:

- Bom rendimento teórico de corrente em relação ao consumo de massa.
- Estabilidade da corrente ao longo do tempo formando películas passivantes.
- Rendimento prático não deve ser muito inferior ao rendimento teórico.

7.2.1.2 Principais características que um ânodo deve ter:

- Potencial suficientemente negativo.
- Alta eficiência, sem impurezas capazes de produzir autocorrosão.
- Baixos teores de ferro nos ânodos de zinco, inibindo fluxo de corrente.
- Estado e corrosão uniformes, evitando passivação.

Os critérios de escolha do tipo de ânodo dependerão das características da superfície a ser protegida e do tipo de eletrólito em contato com o material metálico.

Os usos de ânodos galvânicos são geralmente para eletrólitos de muito baixa resistividade elétrica, ou seja, para resistividade elétrica até $3000 \Omega \cdot \text{cm}$, pois apresentam ddp muito pequenas, necessitando de circuitos com baixa resistência elétrica capazes de liberar a corrente necessária para a proteção catódica.

Se a superfície a ser protegida requisier para sua proteção até 5 A (ampères), é recomendada a utilização de proteção catódica galvânica tanto pelos aspectos técnicos quanto econômicos da proteção.

Os ânodos que forem utilizados na proteção catódica galvânica em superfícies enterradas devem ser protegidos com enchimento condutor (mistura de gesso, bentonita e sulfato de sódio), uniformizando seu consumo e melhorando sua eficiência. Devem-se evitar películas passivantes, pois possuem a capacidade de absorverem umidade do solo, diminuindo por consequência, a resistência de aterramento e possibilitando melhor fluxo de corrente do ânodo para o solo.

Vamos apresentar um fluxograma esquemático (Figura 7.5), que permitirá melhor compreensão do processo.

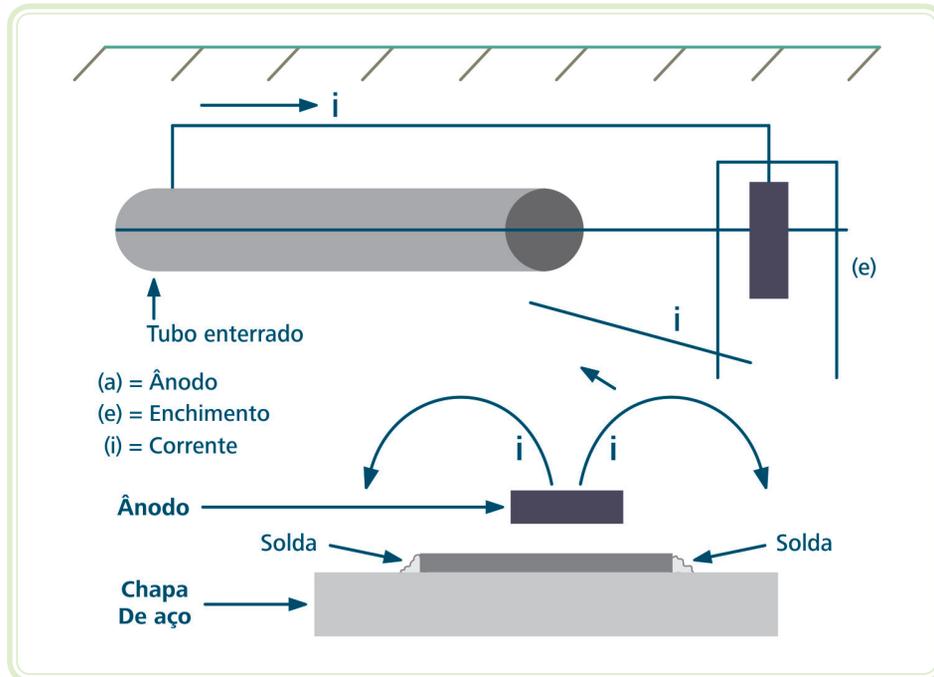


Figura 7.5: Esquemas de proteção catódica em tubulação enterrada e sistemas galvânicos
 Fonte: Oliveira, 2008

7.2.1.3 Classificação da proteção catódica em uma superfície metálica

A proteção catódica pode ser utilizada de duas maneiras:

- Proteção catódica por corrente impressa.
- Proteção catódica por ânodos de sacrifícios.

7.3 Aplicação

O sistema de proteção catódica pode ser utilizado de duas maneiras distintas, ou seja, pode ser aplicado por corrente catódica com ânodos de sacrifício ou ânodos galvânicos ou somente através de corrente impressa com o uso de retificadores de corrente, porém não é possível seu uso em proteção de sistemas aéreos.

7.4 Proteção catódica por corrente impressa

O funcionamento do processo baseia-se no mesmo princípio do fluxo de elétrons ou de corrente requerida para a proteção por sistemas galvânicos. No entanto, o fluxo de elétrons vem da força eletromotriz (f.e.m.) de uma fonte geradora de corrente elétrica contínua retificada, sendo necessário que a dispersão dessa corrente no eletrólito ocorra através de ânodos inertes próprios que variam em função do eletrólito.

É um método cuja vantagem está no fato de o retificador apresentar potência e tensão de saída variadas segundo a exigência da proteção, que depende de resistividade elétrica do eletrólito. Sua aplicação é muito comum em proteção de estruturas em contato com eletrólitos de baixa, média, alta e altíssima resistividade elétrica.

Cuidado

Ao se colocarem os ânodos inertes (Figura 7.6) na superfície enterrada no solo, é preciso envolvê-los com um enchimento condutor de coque moído cuja resistividade elétrica seja no máximo de 100 ohms.cm, pois ele diminui a resistência de aterramento, facilitando o escoamento da corrente do ânodo para o solo e reduzindo o desgaste do ânodo inerte utilizado, que é normalmente de grafite.

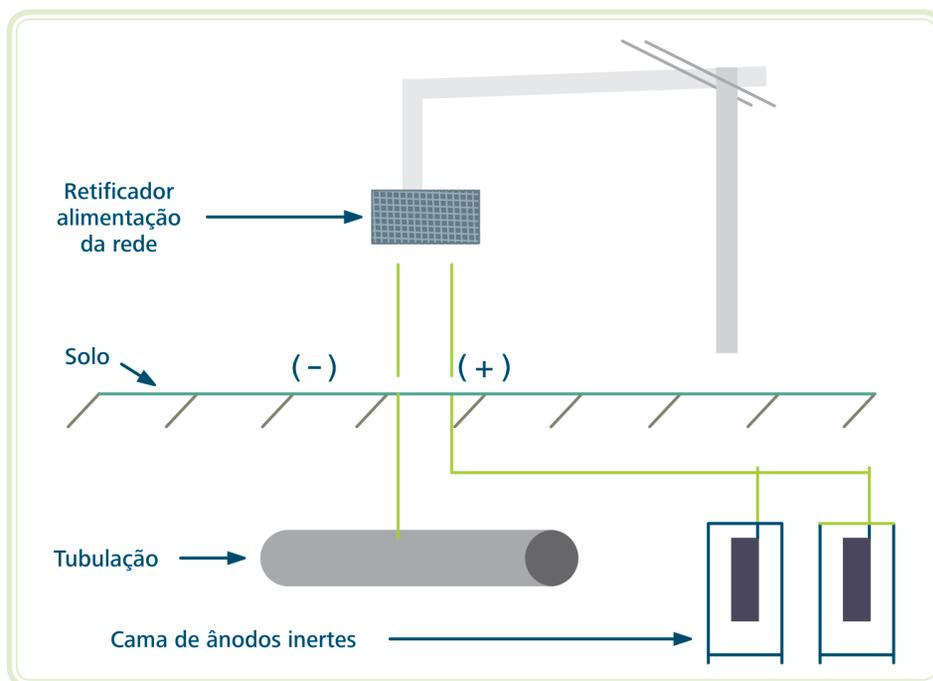


Figura 7.6: Esquema de proteção catódica com a cama de ânodos inertes

Fonte: Oliveira, 2008

Faremos uma revisão de Química Aplicada para melhor compreensão das reações envolvidas no processo de proteção catódica.

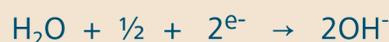
Na proteção galvânica

Área anódica:



ânodos

Área catódica aerada:



Área catódica não aerada:



Não se deve superproteger uma superfície metálica quando for realizar uma proteção catódica, em virtude da ocorrência de H_2 e OH^- na área catódica, o que pode produzir fragilização do aço ou empoamento do revestimento.

Devemos observar que os íons (OH^-) podem atacar o alumínio, o zinco, o chumbo, o estanho, que são anfóteros, daí a importância do uso de revestimentos com tintas não saponificáveis, ou tintas epóxi ou vinílicas.

É possível aplicar a proteção catódica de tubulações enterradas em sistemas galvânicos, quando em corrente impressa em casos de superfícies que apresentem grande porte com resistividade elétrica do solo maior que $3000 \Omega \cdot \text{cm}$.

Na proteção catódica em tubulações submersas, os sistemas por corrente impressa são os mais utilizados, embora seja possível utilizarem-se ânodos galvânicos de magnésio em água doce, zinco e alumínio em água salgada.

Em tanques de armazenamento utilizam-se os dois sistemas de proteção catódica, seguindo as mesmas orientações para tubulações enterradas. O aterramento elétrico, em vez de ajudar, traz mais problemas de corrosão pela formação de par galvânico do aço a ser protegido com os cabos de cobre do aterramento.

Quando se realiza proteção catódica em navios, é ideal que se usem na proteção catódica interna de tanques de lastro, os sistemas galvânicos de zinco



Você agora tem dimensão da importância do processo de proteção catódica, pois além de muito utilizada, tem vasta aplicação em estacas cravadas no mar, principalmente por corrente impressa e em último caso, através de ânodos galvânicos.

e alumínio. Na parte externa do navio, podem ser utilizados os dois sistemas de proteção catódica e tintas não saponificáveis.

Quando o pH é menor que 4,5 ou então o oxigênio que estiver em toda a solução aquosa estiver com concentração $\pm 0,0001$ molar é preciso ter certeza de que está ocorrendo corrosão.

Como o oxigênio varia em função da temperatura e do teor de sais dissolvidos, por sua concentração baixa, a corrosão somente será efetiva quando o pH for maior que 4,5.

Resumo

Nesta aula obtiveram-se informações básicas para construir um projeto de proteção catódica, seja por corrente impressa, seja por ânodos de sacrifício, identificando os diferentes mecanismos de funcionamento de proteção e controle de proteção catódica, em diferentes meios de alta agressividade corrosiva, comparando a outras técnicas de proteção anticorrosiva.

Demonstrou-se a importância do processo de proteção por corrente impressa ou por ânodos de sacrifício aplicado às estruturas metálicas enterradas ou submersas, tais como oleodutos, gaseodutos, minerodutos, adutoras ou fundações metálicas, além de torres de transmissão de alta tensão.



Atividades de aprendizagem

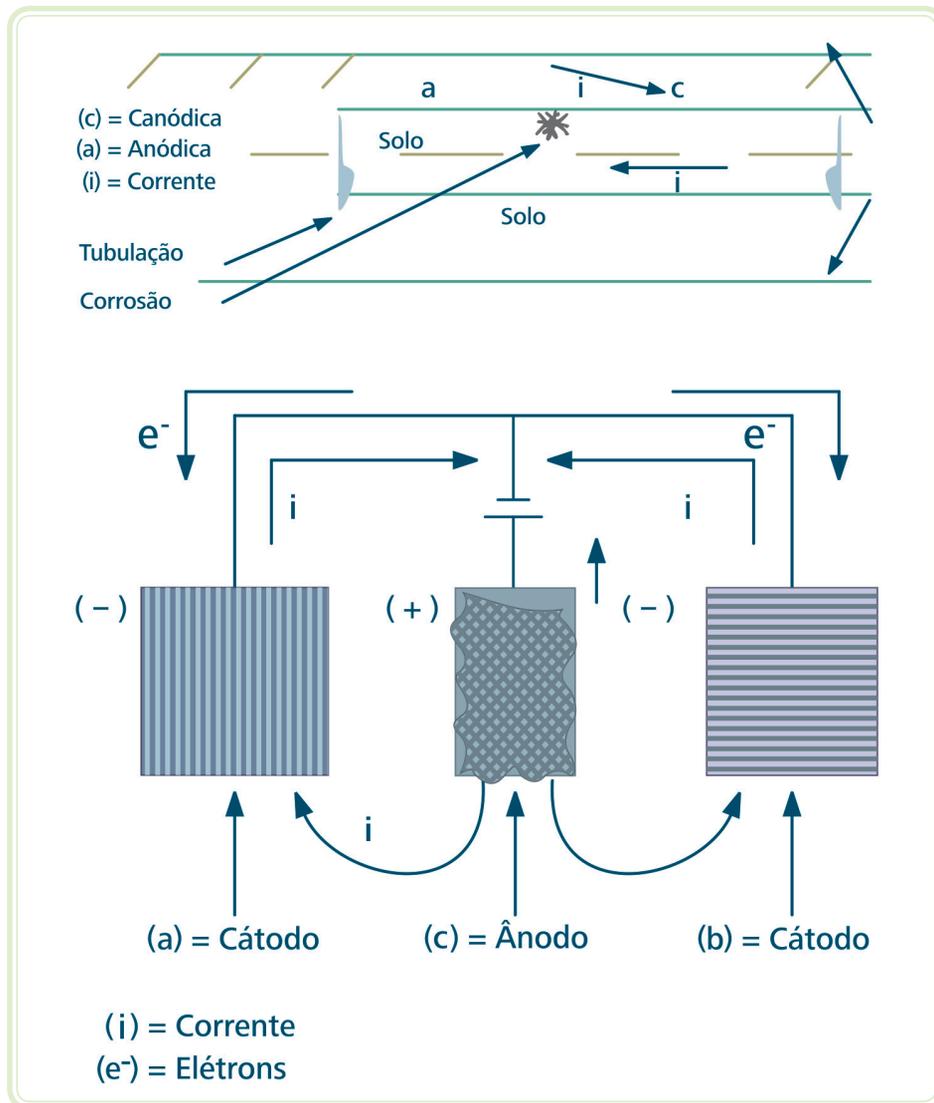
1. O aluno após a leitura desta unidade deverá postar na plataforma um projeto de pesquisa sobre proteção catódica, envolvendo revestimentos metálicos, não metálicos, sistemas de pintura, tratamentos de superfície e proteção catódica. Esse projeto deve ser construído em parceria com, no máximo, cinco alunos. Para isso deverá ser realizado um fórum.

Oferecemos uma série de informações para auxiliá-lo na construção do projeto de proteção de uma superfície metálica.

Nesse trabalho há necessidade de o aluno rever as aulas anteriores para contextualizar o cenário técnico de proteção de um determinado material metálico.

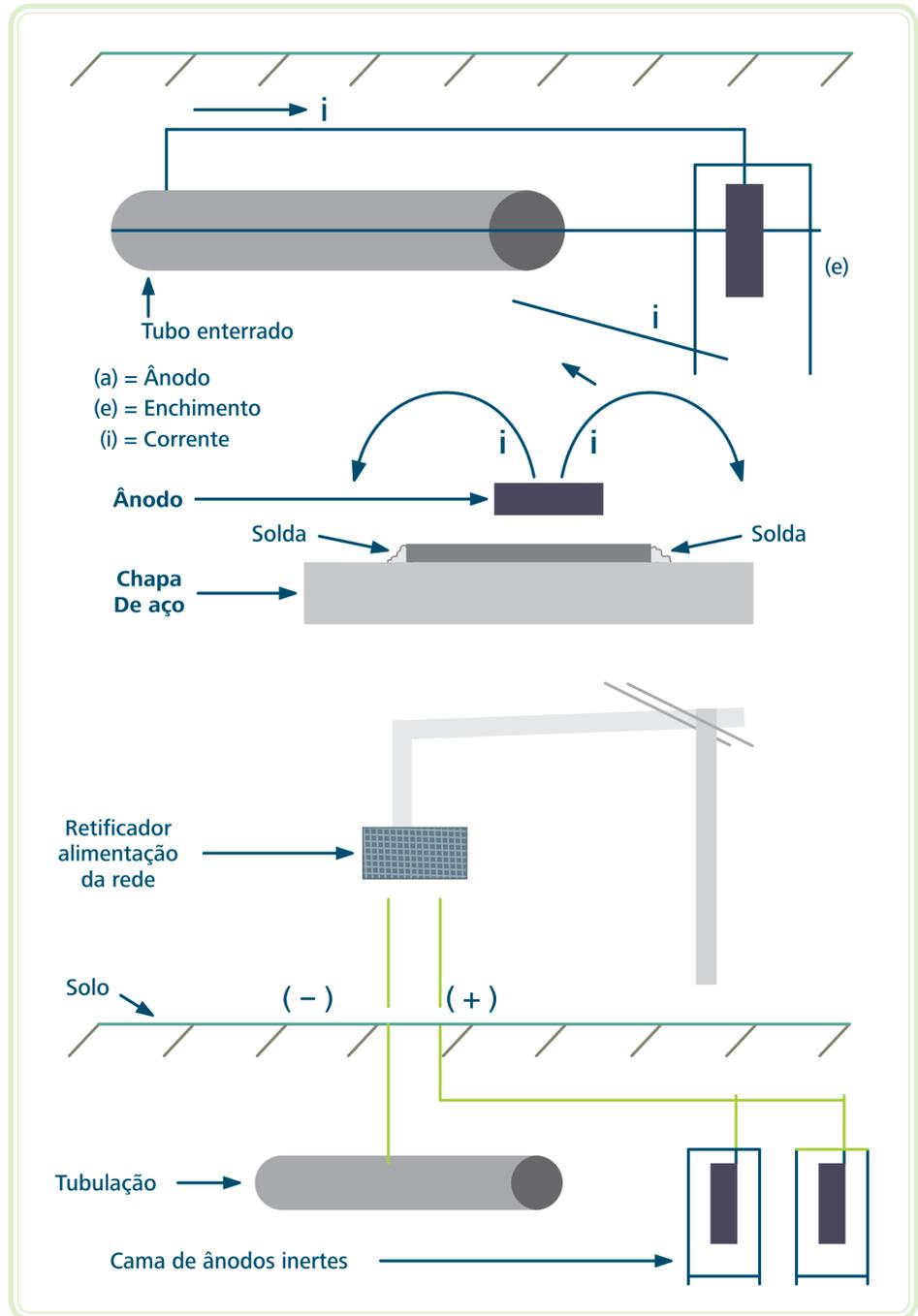
Projeto de proteção de corrosão

Enquanto você está lendo seu trabalho, 760 kg de ferro foram corroídos totalmente. O que você está fazendo para mudar isso?



Exercício 1.1: Esquema de proteção catódica completo

Fonte: Oliveira, 2008



Exercício 1.2: Esquema de proteção catódica por corrente impressa

Fonte: Oliveira, 2008

Seguem os dados necessários para o projeto de proteção de corrosão a ser construído pela equipe para um período médio de 20 anos de proteção anti-corrosiva, para uma tubulação que transporta produto químico corrosivo feito em aço SAE 1050, com diâmetro de 20 polegadas, em 80 km de distância, numa região com alta umidade.

Algumas questões são de fundamental importância no projeto: Como se justifica a utilização de revestimento à base de alcatrão de hulha e fibra de vidro? Porque não utilizar apenas revestimento à base de zarcão e pintura de acabamento em tinta sintética? Explique os critérios de utilização do revestimento à base de destilação do petróleo. Por que a melhor proteção é por proteção catódica e não outra forma de proteção? Se for por proteção catódica, por que escolheu por corrente impressa ou por corrente de sacrifício?

Ainda, será necessário considerar que esta tubulação precisou passar por processos de tratamento de superfície, tais como fosfatização ou qualquer outro processo de limpeza por ação mecânica? Por que a utilização desse tratamento de superfície?

Sabe-se que a cada 10 km, foram feitas as medições de resistividade do solo, utilizando-se uma média de 10 pontos de testes e cinco testes em cada ponto, com profundidades de 2, 4, 6 metros do nível do solo, dando em média $\sigma_{\text{média}} = 130.000$ ohms.cm. Qual foi o método utilizado para calcular a resistividade do solo em toda sua extensão sabendo-se que foi necessário calcular a corrente elétrica para a proteção da tubulação, seguida da utilização de um fator de correção $F = 1$, para a velocidade do fluido em m/s?

Você já deve ter escolhido o tipo de revestimento a ser utilizado e identificado sua eficiência. Logo, é preciso que você utilize um retificador caso tenha escolhido proteção por corrente impressa, e ele apresentar 85% de eficiência de carga. Quantos retificadores serão utilizados no projeto e quanto de corrente elétrica nominal cada retificador deve ter para atender à proteção catódica?

Se tiver escolhido proteção catódica por corrente impressa, como vai projetar a cama de retificadores ao longo de 80 km e o respectivo preparo da cama de ânodos inertes, com três retificadores?

Caso você tenha escolhido proteção catódica por corrente impressa e projetado uma cama de ânodos inertes, sendo os ânodos escolhidos os de grafite, você deverá decidir por um determinado número de ânodos de grafite e, através de suas dimensões, deverá calcular sua massa por ânodo utilizado. Após saber quanto será a amperagem do retificador utilizado, qual seria a vida útil desses ânodos para um trabalho em carga máxima?

Sabendo-se que existem vários pontos ao longo do trajeto com torres da Eletronorte com inúmeros aterramentos, como se deve proceder para evitar fuga de corrente de áreas de proteção e fuga para áreas vizinhas à tubulação?

Quantos pontos de testes serão necessários para que haja total segurança de controle da proteção catódica desenvolvida?

Qual será sua escolha para o eletrodo de referência no controle do potencial de corrosão?

Se você decidiu por proteção por ânodo de sacrifício, como você vai dispor esses ânodos e como vai distribuí-los ao longo de 80 km de tubulação, para atender à quantidade de corrente necessária à proteção catódica?

Sabendo-se que o potencial de proteção do aço é -0,80 volts para Ag/AgCl e -0,85 volts para Cu/CuSO₄, como se calcula a resistência total do sistema estrutura + eletrólito + ânodo + cabo de ligação + eletrólito após escolher o tipo de ânodo galvânico e ter definido sua massa comercial e sua capacidade de corrente em A.h/kg de massa e sua corrente nominal em ampères? Qual o fator que fundamenta a escolha por corrente impressa e não por corrente por sacrifício ou vice-versa?

Se a equipe perceber a falta de dados para a realização do trabalho (este é um ponto importante de pesquisa e avaliação), justifique a sua inclusão e o critério de utilização de dados relevantes ao cálculo da corrente a ser impressa.

Após 02 (dois) anos a equipe deve realizar ensaios de comprovação de proteção. Faça uma síntese desta avaliação.

No projeto deve ser evidenciado que em um determinado trecho ao longo da tubulação, identificou-se a presença de *Thiobacillus thiooxidans*. Somente a proteção catódica resolve o problema ou é preciso algum outro procedimento alternativo?

É importante que o projeto de proteção contra a corrosão deva ser feito seguindo as normas para realização de projeto de pesquisa, tais como: apresentação, objetivo, desenvolvimento, conclusão na qual deve responder as questões propostas e bibliografia.

Após sua realização deverá ser postado em PDF até o último dia de aula.

Treinamento de cálculos para elaboração do projeto de proteção catódica

Cálculos da corrente necessária de proteção.

Equação 7.1

$$A = Dc \times F (I - E)$$

Onde: A = área em m²

Dc = densidade de corrente elétrica em mA/m²

F = fator de correção com a velocidade de fluxo

I = corrente em mA

E = eficiência do revestimento

Na área, deve-se utilizar apenas o que se precisa para proteger.

Para encontrar Dc considere a superfície sem revestimento e a resistividade do solo.

Equação 7.2

$$Dc = 73,73 - 13,35 \log r$$

Onde: r = resistividade do solo em ohm.cm

A velocidade em m/s deve-se verificar na tabela 24.6 de Gentil (1996).

A eficiência do revestimento vem com a experiência em corrosão.

Existe uma estimativa na tabela 24.7 do livro Corrosão. (GENTIL,1996).

Cálculo da resistência para a aplicação dos ânodos galvânicos.

Equação 7.3

$$I = \frac{\Delta V}{R_{total}}$$

Onde: I = corrente de proteção em mA

ΔV = ddp entre ânodo galvânico e a estrutura em volt

R = resistência total em ohm

Deve a corrente ser igual ou maior à corrente de proteção.

O valor da diferença de voltagem, que é o potencial natural do ânodo (tabela 34.8 de Gentil (1996) em cujo potencial de proteção do material metálico da estrutura significa o valor de (-0,85 volts segundo Cu/CuSO₄) para o aço ou: -0,80 volts em relação ao eletrodo de Ag/AgCl.

Equação 7.4

$$\text{Resistência total } (R_{\text{total}}) = R_{\text{ca}} + R_{\text{c}} + R_{\text{a}}$$

Onde: R_{ca} = resistência do cabo elétrico de ligação entre o ânodo e a estrutura
 R_{c} = resistência do cátodo que é a estrutura e o solo que a envolve
 R_{a} = resistência entre ânodo e o solo

Caso o solo tiver resistividade muito baixa, a sua resistência é desprezada.

Cálculo de resistência de um ânodo cilíndrico instalado na posição vertical.

Equação 7.5

$$R_v = \frac{0,0052}{L} \left(\frac{2,3 \log L}{d} - 1 \right)$$

Onde: R = resistividade em ohm.cm
 L = comprimento do ânodo em ft
 d = diâmetro do ânodo em ft

Os valores de (**L**) e (**d**) podem ser o comprimento e o diâmetro de enchimento.

Cálculo da resistência de um grupo de ânodos verticais instalados em paralelo:

Equação 7.6

$$R_a = \frac{0,0052}{NL} r \left(2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 \right) + \frac{2L}{S} 2,3 \log 0,656 N$$

Onde: S = espaçamento entre ânodos em ft
 N = nº de ânodos

Cálculo da resistência de um ânodo cilíndrico instalado na posição horizontal.

Equação 7.7

$$R_h = \frac{0,0052}{L} r \left(2,3 \log 4L^2 + \frac{4L\sqrt{p^2}}{d \cdot p} + L^2 \right) + \frac{P}{L} - \frac{\sqrt{p^2}}{L} + L^2 - 1$$

Onde: L = comprimento do ânodo em ft
r = resistividade em ohm.cm (solo)
d = diâmetro do ânodo em ft
p = dobro da profundidade do ânodo em ft

Atenção: se existir mais de um ânodo, dividir Rh/N.

Onde: N = nº de ânodos

Cálculo da vida útil dos ânodos galvânicos.

Sabe-se que o seu tempo de duração é estabelecido pela massa total de ânodos para uma determinada vida.

Equação 7.8

$$V = \frac{M \cdot C \cdot 0,85}{8760 \cdot I}$$

Onde: V = vida em anos
M = massa do ânodo em kg
C = capacidade de corrente do ânodo em A.h/kg. Está na tabela 24.8 do Gentil (1996), sendo bom confirmar com o fabricante
I = corrente liberada pelos ânodos (A)

O fator de correção do ânodo é 0,85 (85%).

Fixar os ânodos na estrutura com solda do tipo *Cadweld* para ânodos fornecidos com cabos elétricos que têm isolamento duplo, camada de polietileno e capa protetora de cloreto de polivinila. Caso o ânodo tenha alma de aço deve-se usar soldagem elétrica.

Observação 1

É sempre bom olhar a tabela 24.3 de Gentil (1996) para consultas.

Observação 2

Existem também ânodos com roscas e parafusos.

Existem outras formas de se encontrar o caminho adequado para proteger uma tubulação enterrada. Basta verificar as dimensões das tubulações, pois se for de médio ou grande porte, o ideal é fazer por corrente impressa, principalmente se a resistividade for superior a 3000 ohms.cm. Nunca usar ânodos galvânicos em áreas que tenham estradas de ferro eletrificadas.

Você vai encontrar: proteção catódica de tubulações enterradas sendo comum usar ânodos de magnésio ensacados de enchimento de gesso, bentonita e sulfato de sódio ou então com zinco. A maioria dos processos de proteção catódica em tubulações coloca os ânodos em leitos ou ligados individualmente à tubulação.

Devem-se instalar pontos de testes ao longo da tubulação protegida (tubo sol), com objetivo de verificar potenciais, sem esquecer que é preciso instalar juntas de isolamento nas extremidades da tubulação.

Exemplo prático

Se identificarmos uma tubulação para transportar gás natural, com comprimento total de 140 km, com diâmetro nominal de 10 pol e o material utilizado for de aço API-5LX-46 e a aplicação de um revestimento externo for de alcatrão de hulha na tubulação, como se escolhe o sistema de proteção desse projeto?

Primeiro deve-se medir a resistividade elétrica do solo, 50 pontos ao longo da tubulação (ou a cada 2,8 km), fazendo-se quatro medições, na profundidade de 1,5, 3,0, 4,5, 6,0 metros do nível do solo, pelo método dos 04 (quatro) pinos, utilizando *vibroground*.

Valores encontrados: resistividade média = 120.000 ohms.cm

Os valores variaram entre locais com 1000 ohms.cm até 900.000 ohms.cm.

Realizou-se o cálculo da corrente elétrica necessária para a proteção catódica.

$$I = A \cdot Dc \cdot F (1 - E)$$

$$A = 111.658 \text{ m}^2 \text{ aproximadamente.}$$

$$r = 120.000 \text{ ohms . cm}$$

$$Dc = 73,73 - 13,35 \log r = 6 \text{ m.A/m}^2 \text{ aproximadamente.}$$

$F = 1$, tabela 24.6 de Gentil (1996).

$E = 0,9$ (90%), tabela 24.7 de Gentil (1996).

Logo: $I = 67$ A aproximadamente.

Feito isso, escolher o tipo de sistema de proteção a ser utilizado. Como a resistividade do solo foi altíssima, é prudente utilizar proteção catódica por corrente impressa.

Para ajudá-lo, vamos mostrar os raciocínios necessários para o entendimento do projeto a ser executado.

1,5% do custo da instalação de uma tubulação enterrada.

Com eletrodo de referência de zinco, deve-se utilizar um enchimento constituído de gesso e bentonita sendo sua relação de potencial na ordem de $Zn = +0,25$ volts, enquanto no $Cu/CuSO_4 = -0,85$ volts.

Os VOM são instrumentos que medem além de voltagens e miliamperagens, também a resistência do sistema.

O *Vibroground* é o instrumento adequado para medir a resistividade do solo. Ele utiliza 4 pinos ou método de Wernner. É alimentado por pilhas comuns e possui dois vibradores síncronos que vão transformar a corrente contínua em alternada, com uma frequência de 97 Hz e uma tensão elevada de 125 volts. Na sua condição de saída no painel, há quatro pinos ou terminais: dois para injetar a corrente no solo e dois para medir a queda de potencial.

O gerador Megger possui seu próprio gerador de corrente acionado por uma manivela.

Para trabalhos de campo, o ideal é o uso de medidores combinados que possam medir em alta e baixa resistência interna.

Os amperímetros que servem para medir a corrente dos ânodos galvânicos devem ser de baixa resistência interna.

Em tubulações enterradas, é fundamental a aplicação de um revestimento protetor que reduza o custo e aumente a eficiência da proteção catódica. É preciso realizar uma análise econômica para verificar o menor custo para instalação em leitos ou individualmente, devendo-se considerar a resistência

dos cabos utilizados. Nos sistemas galvânicos, o custo no consumo do material protetor, ou seja, do ânodo utilizado na proteção, é estimada na relação custo x benefício de baixo custo de inspeção e manutenção.

A pasta epóxi é adequada para proteção de conexões e para proteção anti-corrosiva por ser um excelente isolante.

Os voltímetros eletrônicos ou digitais possuem resistências da ordem de 10^6 a 10^8 ohms/volts. O ideal é que possam medir potenciais inferiores a 1 volt, seja de precisão e exatidão (0,25 a 0,50%). Devem ter alta resistência interna superior a 50.000 ohms/volts.

Os voltímetros convencionais de baixa resistência são ideais para medidas de potenciais em um ou dois milivolts, pois não circula corrente suficiente através dos circuitos dos voltímetros de alta resistência interna, por isso, é preciso se utilizar um fator de correção.

Os voltímetros potenciométricos são utilizados em resistividades muito elevadas, e os voltímetros eletrônicos são de elevada resistência interna. Na escala de 1 volt, a resistência é da ordem de 11.000.000 ohms/volts, tornando-os práticos e ideais para uso de campo, especialmente os digitais.

Vejamos: se a leitura for feita em voltímetro comum com uma resistência em torno de 1000 ohm/volts, é preciso usar fatores de correção.

Exemplo: leitura = -0,30 volts (aqui já indicaria sem proteção).

Equação 7.9

$$F = \frac{R_i + R_e}{R_i}$$

Onde: R_i = resistência interna do voltímetro (ohm)

R_e = resistência interna do circuito sob medição (ohm)

Se: R_e = 2000 ohms.

$$\text{Logo: } \frac{1000 + 2000}{1000} = 3$$

Logo: $-0,30 \times 3 = -0,90$ volts = isto seria verdadeiro e indicaria a estrutura protegida.

Os ânodos de zinco possuem de 1 a 83 kg de massa.

Os ânodos de magnésio possuem de 0,3 a 17 kg de massa.

O enchimento condutor *Brackfill* tem suas peculiaridades. Ele evita o contato do ânodo com o solo, não deixando que ocorra autocorrosão. Ele homogeneiza o desgaste e retém umidade, sendo útil para solos secos. Fornece baixa resistividade, o que contribui para baixar a resistência elétrica do circuito.

Para ânodos de zinco, usar 50% de gesso com 50% de bentonita. Se o solo tiver alta resistividade, colocar sulfato de sódio com 75% de bentonita 20% de gesso, 5% de sulfato de sódio. Os ânodos de magnésio trazem seu enchimento quando são adquiridos no mercado.

Atenção

Como as tensões são baixas na proteção catódica, deve-se usar força eletromotriz baixíssima, portanto, deve-se evitar o máximo de resistência no circuito.

A corrente máxima admissível é fundamental, logo, os cabos devem ser de bitola 8 AWG a 4 AWG ou seus equivalentes na série métrica, pois atendem a nível de resistência e de corrente máxima admissíveis. O isolamento deve suportar as condições de trabalho e de contato com o solo.

Na prática, os conectores entre cabos devem ser de pressão do tipo parafuso fundido ou equivalente, devendo ser protegidos através de muflas plásticas isolantes e impermeáveis. Quando for utilizar solda, utilizar *Cadweld* ou Aluminotérmica, pois é o ideal para serviços de campo e para ligar cabos elétricos em estruturas de aço.

Revisão teórica da prática de proteção

O pressuposto teórico é controlar a reação do metal com o meio, preservando características técnicas e tempo de vida útil.

Evitar qualquer tipo de contato galvânico ao longo da tubulação, seja no nível de soldagem e uniões, seja pela corrosão acelerada por interfaces.

Supervisionar soldagem evitando formação de frestas e tipos de geometria inadequados que podem reter combinações corrosivas.

Evitar alta rugosidade nas interfaces de soldagem.

Na proteção catódica, o objetivo é que o metal a ser protegido tenha seu potencial interfacial mais negativo.

Caso se aplique uma proteção onde o grau de polarização catódica no metal for suficientemente negativo, é possível eliminar a corrosão a níveis desprezíveis.

Caso trabalhe com aço, se o potencial for alcançado em (-0,85 V), para o eletrodo de sulfato de cobre, já é possível considerar a estrutura protegida em solos e água do mar. Caso tenha bactérias no solo, usar um potencial mais negativo (-0,95 V).

Se a estrutura apresentar revestimentos, vai alterar a análise da velocidade de corrosão, podendo até alterar a corrente requerida para a proteção catódica.

São os ânodos de sacrifício de alumínio, zinco e magnésio os melhores para proteger estruturas e tubulações de aço, porém, é preciso medir o potencial depois de colocado para saber se é ideal para aquele solo e sua resistividade.

Deve-se atentar para a composição e formas do ânodo de sacrifício, que influenciam diretamente no potencial anódico de autocorrosão, modificando a eficiência de proteção do ânodo.

É preciso especificar as formas dos ânodos a serem utilizados como ânodos de sacrifícios, em função da quantidade de corrente para determinado peso de ânodo, garantindo a sua vida útil.

Os contatos elétricos de aço dos ânodos precisam ter perfeita condutibilidade elétrica. Na hora em que o ânodo é conectado à tubulação de aço, o potencial é reduzido para (-0,85 V).

Se o rendimento da corrente anódica for maior, menor será o número de ânodos a serem requeridos para produzirem uma densidade de corrente específica em relação à área do aço a ser protegida. O ânodo tem capacidade expressa como A.horas/kg, sendo ($Ah \times kg^{-1}$), que é a corrente que este ânodo pode produzir, para ser capaz de proteger catodicamente.

Nesse processo de utilização de ânodos de sacrifícios não devemos esquecer que o ânodo deve ser sempre protegido e circundado em leitos de proteção para diminuir a resistência elétrica na interface solo/ânodo.

O zinco é mais eletronegativo do que o aço. Protege o aço sacrificando-se a uma velocidade constante e lenta na atmosfera. Tem baixo custo e facilidade de aplicação por revestimentos por pintura com tintas ricas em zinco, caso sejam aplicadas em até 40 micrometros de espessura em revestimento uniforme e de boa adesão.

Deve-se realizar análise do solo, pois ele pode apresentar baixa resistividade, baixo potencial redox, baixo pH, alta concentração de ferro solúvel e ainda bactérias redutoras de sulfato que aumentarão a corrosividade do solo.

Deve-se verificar a compacidade do solo e seu teor de água, pois solo geralmente arenoso seco é menos corrosivo do que o argiloso úmido. As variações de oxigênio no solo podem aumentar a corrosão pela formação de células de concentração ou aeração diferencial.

Concentrações altas de sais podem tornar o solo condutor e de baixa resistividade, dando origem às células de corrosão principalmente às por *pites*.

Caso se revestir a tubulação com tintas à base de zinco, revestimentos betuminosos, revestimentos à base de cimento, tintas contendo derivados de borracha e resinas sintéticas e ainda a proteção catódica combinada, seu custo pode ficar super elevado.

Caso existam bactérias anaeróbicas no solo, o uso de revestimentos de alcatrão, concreto, betume ou matéria-prima utilizada em asfalto tem a propriedade de diminuir em muito a agressividade do solo, evitando a corrosão.

Caso o solo apresente diferente resistividade, irá formar pilhas de corrosão diferencial, pois o que se encontra com baixa resistividade funciona como ânodo em relação ao que apresenta alta resistividade. Solo com baixa resistividade é solo muito agressivo, apresentando concentrações de sais e de umidade.

Caso decida usar revestimentos de piche de carvão, aplicar em duas espessuras (a 1ª de 3 a 5 mm e a 2ª de 6 a 8 mm); a segunda somente para meios altamente agressivos.

O revestimento com tintas em tubulações enterradas somente é recomendado em obras pequenas e onde não são solicitados alto grau de proteção ou quando o solo é de baixa resistividade. No entanto é ideal quando acompanhada de proteção catódica.

Proteção galvânica somente é eficaz quando for para eletrólitos de baixa resistividade elétrica (solos até 6000 ohms.cm), podendo-se usar ânodos de magnésio. Para solos que não tenham mais que 1500 ohms.cm, usar ânodos de zinco.

Em grandes estruturas, a massa de ânodos a ser requerida para proteção pode ser muito grande e pode não ser viável economicamente, precisando de grande reposição de ânodos.

Revestimentos usados associados à proteção catódica diminuem muito a intensidade de corrente requerida. É de ± 20 anos a durabilidade média de uma estrutura protegida catodicamente com revestimento de piche de carvão, tintas epóxi ou betuminosas, argamassa de cimento.

Para se verificar o potencial mínimo negativo entre a estrutura e o meio, é de relevância técnica medir o potencial de corrosão, pois ainda é uma das formas mais eficazes para comprovar se uma estrutura se encontra isenta de riscos de corrosão sendo que o eletrodo de referência é a forma eficaz para esse procedimento.

Ainda é este o meio mais eficaz e de menor custo operacional. O potencial deverá estar sempre mais negativo do que o valor absoluto mínimo estabelecido para a estrutura em relação ao eletrodo considerado para a proteção. Os valores que seguem correspondem a +0,25 V, em relação ao eletrodo de zinco.

No caso do aço para sulfato de cobre é -0,85 V.

No caso de aço para cloreto de prata é -0,80 V.

No caso de calomelano no aço é de -0,77 V.

Como se mede o potencial de uma estrutura enterrada

Usar um voltímetro de corrente contínua, de alta resistência interna (50.000 ohms.cm). Quanto mais próximo estiver o eletrodo de referência do tubo, melhor ele deve ficar na superfície do solo, na direção da geratriz superior do tubo, sendo essencial uma boa condução do contato com a tubulação. Caso estiver seco, umedecer com água. Para a leitura normal, é dado um valor negativo e devem-se realizar várias medidas ao longo da tubulação e lançar valores em gráficos em função da distância e o potencial negativo na ordenada. Na medida em que se afasta o eletrodo de referência da tubulação, o

potencial chamado de remoto vai ficando constante. Isso porque a corrente de proteção catódica pode introduzir gradientes de tensão na superfície do solo.

Como realizar um teste para verificar conveniência de proteção em estrutura de aço

- Realiza-se um teste para verificar a conveniência de se utilizar uma estrutura de aço revestida que, quando superprotegida pode causar danos por excessiva alcalinidade no caso de zinco, alumínio, chumbo, estanho ou empoamento do revestimento.
- Então se deve medir o potencial da estrutura com o solo, utilizando eletrodo de referência de sulfato de cobre com leitura direta, quando estiver ligado à proteção catódica e sem interromper a leitura, desligar a proteção catódica. Depois de 2 segundos, deve-se fazer nova leitura. Se a nova leitura apresentar um valor mais negativo que -1,2 volts, existe evolução de hidrogênio e danos no revestimento.
- Levantar a resistividade do solo e verificar os locais para instalações dos leitos de ânodos galvânicos.
- Medir o potencial da tubulação junto ao meio em que ela é colocada.
- Verificar se ao longo da linha de instalação existe corrente de interferências.
- Testar a eficiência dos revestimentos aplicados à tubulação.
- Determinar a corrente necessária à proteção.

Atenção

Com o conhecimento da resistividade, calcula-se a densidade de corrente a ser utilizada na proteção catódica. O importante é traçar ao longo da tubulação, um perfil de resistividade onde se injeta uma determinada corrente por meio de pinos externos e, na medida da queda da voltagem no solo, por meio dos dois pinos internos, aplicam-se quatro pinos de ± 30 cm de comprimento encravados no solo, dispostos segundo uma linha reta e igualmente espaçada entre si.

Vejam os:

Equação 7.10

$$r = 2\pi \cdot a \cdot \frac{V}{I}$$

Onde: r = resistividade (ohm.cm)

a = espaçamento entre pinos (cm)

V = voltagem nos pinos internos (V)

I = corrente injetada (A)

Exemplo

$r = 191,5 \text{ aV}$

(a) = espaçamento em ft (pé)

(a) = profundidade de solo = 1,5 m; 3,0 m; 4,5 m; 6,0 m

ft = 5; 10; 15; 20

160 cm = $2\pi a = 1000$

320 cm = $2\pi a = 2000$

480 cm = $2\pi a = 3000$

640 cm = $2\pi a = 4000$

Baixa resistividade = até 3000 ohms.cm

Média = 3000 a 15.000 ohms.cm

Alta = 15.000 a 50.000 ohms.cm

Altíssima = acima de 50.000 ohms.cm

Nesta etapa, é preciso observar que para se medir o potencial ao longo da estrutura e ter uma avaliação do seu estado de corrosão, tornam-se necessárias análises da possível presença de macropilhas de corrosão e de correntes de fuga ou de interferência, daí, a importância do uso do eletrodo de sulfato de cobre.

Existe um quadro padrão que pode ser seguido:

Quadro 7.1: Resistividade x tipos de solo			
POTENCIAL (volts) Cu/CuSO ₄ sat	Resistividade do solo (ohm.cm)		
	500 a 1.000	1.000 a 10.000	10.000 a 100.000
Até -0,4	Pouco agressivo	Muito pouco corrosivo	Não corrosivo
Entre -0,4 e -0,5	Moderado corrosivo	Pouco corrosivo	Muito pouco corrosivo
Entre -0,5 e -0,6	Corrosivo	Moderado corrosivo	Pouco corrosivo
Além de -0,6	Muito corrosivo	Corrosivo	Moderado corrosivo

Fonte: Dutra, 1987

Observação

Os riscos são ao longo da tubulação em caso de existirem resistividades diferentes, pois surgem resistividades diferenciais que podem elevar o processo corrosivo.

Instalar os ânodos em locais de baixa resistividade elétrica e de fácil instalação, sendo os ânodos de zinco em solos de até 1500 ohms.cm e de magnésio entre 1500 a 6000 ohms.cm.

Para se calcular a corrente que deve ser requerida, é preciso calcular a corrente de proteção da estrutura a ser protegida.

Para encontrar a densidade de corrente de proteção em mA/m² ou então em mA/ft², dependerá da resistividade do solo e do tipo do material a ser protegido.

Vejamos:

$$d = 13,35 \log 10^{5,523} = 73,73 - 13,35 \log r$$

A eficiência de um revestimento

Quando o revestimento for associado à proteção catódica, ocorre uma grande redução da área exposta ao meio corrosivo e a diminuição da intensidade de corrente que é requerida para proteção, sendo ideal a verificação da eficiência do revestimento em tubulações enterradas.

Em situações onde existam tubulações enterradas, utiliza-se uma tubulação provisória e aplicam-se ânodos provisórios, medindo-se o potencial e então se determina o trecho que fica protegido com a corrente de ânodos utilizados.

Medindo-se a resistividade do solo no trecho considerado e pelo diagrama resistividade *versus* densidade de corrente, encontra-se a eficiência do revestimento.

Equação 7.11

$$E = \frac{(I - 1) \cdot 100}{S \cdot d}$$

Onde: E = eficiência em percentagem

I = corrente em A

S = área da superfície em m²

d = densidade de corrente em A/m²

Caso não seja possível estimar a distância onde serão aplicadas as correntes de proteção, utilizam-se dados práticos referidos na literatura técnica.

Para se calcular a corrente que deve ser requerida, basta usar:

Equação 7.12

$$I = S \cdot d \cdot f (1 - E)$$

Logo: I = corrente em A

S = área em m²

d = densidade de corrente de proteção em A/m²

f = fator de velocidade relativa estrutura/meio em m/s

E = eficiência do revestimento em fração decimal

Referências

DUTRA, Aldo Cordeiro; NUNES, Laerce de Paula. **Proteção catódica**. Rio de Janeiro - RJ: Editora Técnica LTDA, 1987.

FELTRE, Ricardo. **Físico-química**. 6. ed. São Paulo: Editora Moderna, 2004.

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

OLIVEIRA, A. Roberto. **Síntese e análise da aprendizagem de autores diversos**. Edição Gráfica IFPA, 2008.

PANNONI, Fabio Domingos. **Fundamentos da corrosão**. 2008. Disponível em: <http://www.livingsteel.ru/images/library/fundamentos_da_corros%3o.pdf>.

SILVA, Paulo Furtado da. **Introdução à corrosão e proteção de superfícies metálicas**. Belo Horizonte - MG: Imprensa da UFMG, 1981.

Currículo do professor-autor



Antônio Roberto de Oliveira, Químico Industrial, Metalúrgico com Formação Acadêmica de Nível Superior pela UFPA, em 1977 Pós-Graduado em Educação com Especialização *lato sensu* em Metodologia do Ensino Superior, em 1998, na Universidade Católica de Minas Gerais – PUC -MG. Graduado em Licenciatura Plena, pela UFPA, em 1983.

Desde 1978, ministra disciplinas no Curso Técnico de Metalurgia e Mecânica como Corrosão Metálica, Organização e Normas do Trabalho, Ética Profissional, Tratamento Térmico de Metais, Siderurgia, Química Aplicada no Curso presencial de Metalurgia. No Nível Superior ministra a Disciplina Ética Profissional para as Licenciaturas; Psicologia do Trabalho e das Relações Interpessoais para o Curso de Tecnologia de Telecomunicações e Engenharia de Materiais; Ética na Gestão Pública para o Curso de Gestão Pública.