

RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS

CORROSÃO

MONITORAÇÃO DA CORROSÃO INTERNA E DA EFICÁCIA DAS PRÁTICAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVAS EXTERNAS EM ESTRUTURAS AÉREAS, ENTERRADAS, EM CONTATO COM A ÁGUA E COM FLUIDOS ALTAMENTE CORROSIVOS

ABRACO-RP-COR-002

V. 01012025

Total de páginas: 25

NOTA 1

A Associação Brasileira de Corrosão alerta os usuários: o uso de suas recomendações práticas requer conhecimento e experiência. O uso inadequado das mesmas e consequentes resultados impróprios não se constituem responsabilidade da Associação.

NOTA 2

É recomendável que todos os trabalhos relacionados aos sistemas de proteção anticorrosiva sejam executados, no que couber, por profissionais certificados conforme procedimentos da Associação Brasileira de Corrosão, relativos à Pintura Anticorrosiva, Proteção Catódica e Galvanização por Imersão à Quente.

COMPOSIÇÃO DO GRUPO DE TRABALHO EXECUTOR

O Grupo de Trabalho responsável pela elaboração da presente Recomendação Prática foi constituído pelas seguintes pessoas:

Laerce de Paula Nunes – Coordenador

Luiz Paulo Gomes – Membro

Carlos Alexandre Martins da Silva – Membro

João Paulo Klausing Gervásio – Membro

Antônio Carlos Pires Caetano – Membro

Camile Paula Theodoro – Membro

Erik Barbosa Nunes – Membro

Daniel Utsch Fernandes Silva – Membro

SUMÁRIO

1.0	OBJETIVO	4
2.0	DOCUMENTOS NORMATIVOS DE REFERÊNCIA	4
3.0	RECOMENDAÇÕES PARA MONITORAÇÃO DA CORROSÃO INTERNA	6
4.0	RECOMENDAÇÕES PARA MONITORAÇÃO DA EFICÁCIA DA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA EXTERNA	16
5.0	CONCLUSÕES	24
6.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

1.0 OBJETIVO

Esta RECOMENDAÇÃO PRÁTICA tem por objetivo apresentar as orientações básicas para monitoração da corrosão interna e da eficácia dos métodos de proteção anticorrosiva em sistemas com fluídos internos tais como: águas de refrigeração, águas de injeção em poços de petróleo, águas produzidas em campos de petróleo e gás, dutos de água, de petróleo e seus derivados, de álcool, de gás e outros sistemas que operem com meios corrosivos.

Tem como objetivo também a monitoração do risco de corrosão externa através de inspeções que permitam avaliar a eficácia dos métodos de proteção anticorrosiva de estruturas aéreas, enterradas, submersas e de concreto armado.

2.0 DOCUMENTOS NORMATIVOS DE REFERÊNCIA

2.1 NORMAS REGULADORAS

- Regulamento Técnico de Dutos Terrestres (RTDT) – ANP - Resolução ANP nº 6/2011

2.2 NORMAS DA ABNT

- ABNT NBR ISO 9223 – Corrosão de metais e ligas metálicas – Corrosividade de atmosferas – Classificação, determinação e estimativa.
- ABNT NBR 15239 – Tratamento de Superfícies de Aço com Ferramentas Manuais e Mecânicas.
- ABNT NBR 15488 – Pintura Industrial – Superfície metálica para aplicação de Tintas – Determinação do perfil de rugosidade.
- ABNT NBR 10 443 - Determinação de espessura de películas de tinta.
- ABNT NBR 11 003 - Determinação de aderência de películas de tinta.
- ABNT NBR 15877 – Pintura Industrial –Ensaio de Aderência por Tração.
- ABNT NBR 15158 - Limpeza de Superfícies de Aço por Compostos Químicos.
- ABNT NBR 15185 - Inspeção de Superfícies para Pintura Industrial.
- ABNT NBR 16172 - Revestimentos Anticorrosivos - Determinação de Descontinuidades em Revestimentos Anticorrosivos Aplicados sobre Substratos Metálicos.
- Norma ABNT NBR 6323:2016 – Galvanização de Produtos de Aço – Especificação.
- Norma ABNT NBR 7397:2016 - Produtos de Aço Galvanizado por Imersão a Quente – Determinação de Massa por Unidade de Área – Método de Ensaio.
- Norma ABNT NBR 7398:2015 – Produtos de Aço Galvanizado por Imersão a Quente – Verificação da Aderência – Método de Ensaio.
- Norma ABNT NBR 7399:2015 – Produtos de Aço Galvanizado por Imersão a Quente – Verificação da Espessura – Método de Ensaio.

- Norma ABNT NBR 7400:2015 – Produtos de Aço Galvanizado por Imersão a Quente – Verificação da Uniformidade – Método de Ensaio.
- ABNT NBR 15221-1 - Tubos de Aço - Revestimento Anticorrosivo Externo - Parte 1: Polietileno em Três Camadas.
- ABNT NBR 15221-2 - Tubos de Aço - Revestimento Anticorrosivo Externo - Parte 2: Polipropileno em Três Camadas.
- ABNT NBR 15221-3 - Tubos de Aço - Revestimento Anticorrosivo Externo - Tubos de Aço - Parte 3: Epóxi em Pó Termicamente Curado.
- ABNT ISO 15589 – Indústria de Petróleo, Petroquímica e Gás Natural – Proteção Catódica de Sistemas de transporte por Dutos – Parte I e II – Dutos Terrestres e Dutos Submarinos.
- ABNT NBR 7117 – Parâmetros do Solo para Projetos – Parte 1 – Medição de Resistividade Elétrica.
- ABNT NBR 16460 - Anodos de liga de magnésio para proteção catódica.
- ABNT NBR 9240 - Anodos de liga de ferro-silício-cromo para proteção catódica.
- ABNT NBR 16294:2014 - Anodos de titânio com óxidos de metais nobres para proteção catódica.
- ABNT NBR 15653 - Critérios para qualificação e certificação de profissionais de proteção catódica.
- ABNT NBR 16265 - Inspeção de anodos para proteção catódica.
- **Nota:** encontra-se em Consulta Pública a Norma para Proteção Catódica de Estruturas de Concreto – Recomendamos aos usuários atenção à sua publicação.

2.3

NORMAS INTERNACIONAIS

- ISO 9224 - Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres — Guiding values for the corrosivity categories.
- ISO 12944-2 - Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Part 2: Classification of environments.
- SP-0775 – Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Hydrocarbon Operations - NACE International (AMPP – Association of Material Protection and Performance)
- ASTM G1-25 - Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.

2.4

RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS - ABRACO

- ABRACO RP – COR - 002 R01 - Avaliação do Nível de Corrosividade Previsto para Estruturas Aéreas, Enterradas, em Contato com a Água e com Fluidos Altamente Corrosivos
- ABRACO RP – PTC – 001 - Critérios para Levantamentos de Campo para Sistemas de Proteção Catódica de Estruturas Terrestres.
- ABRACO RP – PTC 002: Recomendações para especificação de fontes de corrente contínua e de drenagens de corrente, em sistemas de Proteção Catódica para estruturas terrestres enterradas.

- ABRACO RP – PTC 003: Recomendações para instalação de sistemas de Proteção Catódica terrestres.
- ABRACO RP – PTC 004: Recomendações para pré-operação de sistemas de Proteção Catódica terrestre.
- ABRACO RP – PTC – 005: Recomendações para Inspeção de Sistemas de Proteção Catódica Terrestres
- ABRACO RP – PTC – 006 - Critérios para Sistemas de Proteção Catódica em Estruturas Marítimas.
- ABRACO RP –CAC – 001 - Corrosão de Armaduras em Estruturas de Concreto - Causas Recomendações de Avaliação, Diagnóstico, Prevenção e Controle.
- ABRACO RP – PAC 001: Recomendações para Preparo de Superfície e Aplicação de Tintas – Controle do Processo e Inspeção na Aplicação.
- ABRACO RP – PAC 002: Recomendações para Seleção de Esquemas de Pintura Anticorrosiva.
- ABRACO RP – PAC 003: Tintas para Pintura Anticorrosiva
- ABRACO RP – RAC – 001 - Recomendações para Proteção Anticorrosiva de Condições Críticas

2.5

NORMA PETROBRAS

- N-2785 – Norma Petrobras - Monitoração, Interpretação e Controle da Corrosão Interna em Dutos. Disponível no endereço eletrônico <https://canalforneecedor.petrobras.com.br/regras-de-contratacao/catalogo-de-padronizacao/>

3.0

RECOMENDAÇÕES PARA MONITORAÇÃO DA CORROSÃO INTERNA

Neste item serão apresentadas recomendações relativas às técnicas de monitoração da corrosão interna, as principais práticas de proteção e a aplicação para alguns equipamentos e instalações mais comuns nas atividades industriais e offshore.

Para um adequado processo de monitoração da corrosão interna é conveniente um estudo preliminar da corrosividade do meio, com avaliação do risco de desenvolvimento de processos corrosivos.

Deve-se também avaliar a(s) técnica(s) de monitoração mais adequadas, bem como a definição dos locais mais propícios à monitoração.

Para definição das melhores práticas recomenda-se a observância dos seguintes aspectos:

- a) Quanto aos fluidos – atenção deve ser dispensada aos seguintes meios:
 - Águas em geral em sistemas de refrigeração, sistemas de geração de vapor, águas de injeção na produção de petróleo e gás, água produzida, dentre outros, especialmente contendo contaminantes como H₂S e CO₂;
 - Sistemas ácidos para todos os metais e básicos para o alumínio e demais metais anfóteros;

- Sistemas contendo amônia, derivados de amônia ou H₂S para o cobre e suas ligas;
- Meios muito aerados para os aços carbono e pouco aerados para os aços inoxidáveis;
- Meios com fase aquosa, como petróleo bruto, álcool hidratado e gases úmidos;
- Sistemas de dutos contendo H₂S e/ou CO₂;
- Sistemas que possam gerar hidrogênio e ocasionar fragilização;
- Meios que possam desenvolver sistemas bacterianos e outros organismos vivos.

b) Quanto aos aspectos construtivos – atenção deve ser dispensada aos seguintes:

- Locais com materiais de nobreza diferente;
- Locais com acúmulo ou sedimentação de água;
- Mudanças bruscas de direção ou restrições de fluxo.

A monitoração fornecerá dados e informações sobre as taxas de corrosão e sobre a necessidade de eventuais melhorias na aplicação das práticas de proteção anticorrosivas.

Todo o trabalho deve ser realizado por profissionais com reconhecida competência na área de corrosão interna e de monitoração da corrosão.

3.1 PRÁTICAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVAS EM SISTEMAS INTERNOS

A resistência à corrosão pode ser ampliada utilizando-se os inibidores de corrosão e modificações do meio corrosivo.

3.1.1 CONTROLE DE CORROSÃO POR INIBIDORES

Os inibidores são compostos químicos que, quando adicionados ao meio corrosivo, diminuem a sua agressividade, por um dos seguintes mecanismos:

- **Inibição anódica (inibidores anódicos):** são compostos que formam produtos insolúveis nas áreas anódicas, produzindo uma polarização anódica. Estes inibidores são também chamados de passivadores.
Exemplos: hidróxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos, boratos de metais alcalinos, nitrito de sódio e cromatos de potássio e sódio.
- **Inibição catódica (inibidores catódicos):** são compostos que formam produtos insolúveis nas áreas catódicas, produzindo uma polarização catódica.
Exemplos: sulfatos de Zinco, magnésio ou níquel.
- **Inibição por barreira (inibidores por adsorção):** são compostos que têm a propriedade de formar películas por adsorção à superfície metálica, criando uma película protetora sobre as áreas anódicas e catódicas.
Exemplos: sabões de metais pesados, aminas, ureia, dentre outros.
- **Sequestradores ou redutores de oxigênio:** são compostos que reagem com o oxigênio promovendo a desaeração do meio.
Exemplos: Sulfito de sódio ($\text{Na}_2\text{SO}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$)
Hidrazina ($\text{N}_2\text{H}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$)

OBS: A desaeração pode também ser efetuada com desaeradores físicos, que são equipamentos que removem o oxigênio por ação de arraste ou descompressão. Nestes equipamentos a água é passada em contracorrente com um gás ou com vapor e estes fluidos removem o oxigênio dissolvido na água ou ainda a água pode ser tratada em vasos com pressão inferior à atmosférica, o que permite a separação do oxigênio.

As principais aplicações dos inibidores são:

- Destilação de petróleo;
- Tratamento de água (caldeira, refrigeração e de injeção)
- Limpeza química e decapagem ácida;
- Sistemas de oleodutos e gasodutos;
- Testes hidrostáticos;
- Sistemas de embalagem e proteção temporária durante transporte e estocagem;
- Áreas de perfuração e produção (fluidos e acidificação).

Os critérios básicos para seleção de inibidores são:

- Deve ser compatível com o processo e com outros aditivos eventualmente presentes;
- Deve ser solúvel e estável (incluindo temperatura e pressão);
- Não deve formar resíduos ou espuma;
- Não deve ser poluente e tóxico;
- Custo baixo, inclusive de despejo.

3.1.2 **CONTROLE DE CORROSÃO POR MODIFICAÇÃO DO MEIO CORROSIVO**

São métodos de aumento da resistência à corrosão, muito utilizados em sistemas de água de refrigeração, água de caldeira, água injeção em poços de petróleo, em fluidos diversos como os de perfuração de poços de petróleo e os de completação.

3.1.2.1 **Desaeração**

A desaeração consiste na retirada de oxigênio do meio, sendo o oxigênio um agente despolarizante, com a sua retirada favorece-se a polarização catódica com a consequente diminuição da intensidade do processo corrosivo.

Os processos de retirada de oxigênio podem ser, como foi dito, químicos ou mecânicos. O processo químico é realizado pelos sequestradores ou redutores de oxigênio, enquanto a retirada do processo mecânico é feita em desaeração por arraste do oxigênio por outro gás, comumente vapor, ou em câmeras de vácuo onde a descompressão propicia a saída de gases.

3.1.2.2 **Controle de pH**

O controle de pH visa favorecer a passivação dos metais, que se tornam passivos com o pH ligeiramente básico.

Cuidados especiais devem-se ser observados nos metais anfóteros que perdem a resistência à corrosão em meios muito básicos e com a precipitação de compostos de cálcio e magnésio que se tornam insolúveis em pH elevado, podendo trazer problemas de incrustação.

3.1.2.3 Controle de Temperatura e Velocidade

O controle de temperatura e velocidade de fluidos visa favorecer a polarização anódica e catódica, com a consequente diminuição da intensidade do processo corrosivo. A velocidade tem uma forte ação despolarizante enquanto a temperatura contribui, ainda com o aumento com a velocidade das reações nos meios líquidos.

As dosagens de inibidores e de modificadores de meio corrosivo devem ser ajustadas com base na experiência dos profissionais que aplicam e dos fornecedores e, se possível, validadas em ambiente de teste.

A eficiência dos inibidores de corrosão e das práticas de modificação dos meios corrosivos é normalmente avaliada a partir dos processos de monitoração ou eventualmente através dos ensaios de corrosão, comparando as taxas de corrosão observadas na monitoração com as taxas antes da aplicação das práticas de proteção anticorrosivas.

Obs. Em águas de circulação (refrigeração, caldeiras, injeção e outras situações que trabalhem com águas com teores altos de cálcio e magnésio) é conveniente avaliar o risco de incrustação pelo índice de Langelier.

3.2 TÉCNICAS DE MONITORAÇÃO DA CORROSÃO INTERNA

Existem várias técnicas utilizadas para monitoração da corrosão interna, nesta Recomendação Prática trataremos das mais comumente empregadas.

3.2.1 CUPONS DE PERDA DE MASSA

Os cupons são altamente usados pela indústria de óleo e gás e também de mineração para ter acesso de maneira bastante simples às taxas de corrosão em tubulações e equipamentos fabricados em aço carbono. É uma técnica relativamente barata e permite coletar dados por longos períodos. Permite também, obter informações a respeito da morfologia do processo corrosivo e natureza dos depósitos.

Um cupom (amostra do metal do equipamento ou uma liga padronizada) é pesado e introduzido no processo. Após um intervalo de tempo razoável o cupom é retirado do processo, limpo de todo o produto de corrosão e novamente pesado. A perda de massa é convertida a uma perda de espessura total, ou taxa de corrosão uniforme.

Para obter a taxa de corrosão com cupons de massa deve-se determinar a variação (perda) de massa do cupom, corrigida da limpeza química, e dividir pelo produto da densidade do metal, pela área total exposta (incluindo as bordas) e tempo de exposição. Para que se faça a correção devido a perda de massa gerada pela decapagem, utiliza-se um cupom prova ou referência que é submetido ao mesmo processo de limpeza química utilizada no cupom exposto. As áreas cobertas pelo suporte do cupom e isolamento devem ser excluídas. Podem ser usadas para calcular a taxa de corrosão as fórmulas da Norma AMPP/NACE SP 0775.

Os cupons podem ser do tipo circular (*flush*) que ficam posicionados tangencialmente ao fluxo do fluido, indicados para dutos pigáveis ou do tipo haste (retangular) que fica transversal ao fluxo.

O tempo de exposição deve ser definido em função do grau de corrosividade do meio. O tempo

médio mínimo pode variar de 3 a 6 meses de exposição.

O preparo da superfície, limpeza, depende do tipo de material. As normas ASTM G1-25 ou AMPP/NACE SP 0775 especificam os procedimentos que deverão ser adotados.

A pesagem do corpo de prova deverá ser realizada em balanças de precisão de 0,001 gramas, devidamente calibradas em laboratórios acreditados na Rede Brasileira de Calibração (RBC) ou em laboratórios de calibração que utilizem os padrões rastreáveis à RBC. Neste caso, os certificados dos padrões rastreáveis devem ser arquivados juntamente com o certificado de calibração.

Vantagens da Técnica:

- Apresenta no período de exposição a forma de corrosão (uniforme ou localizada);
- Mede a perda de espessura real no período de exposição;
- Permite a caracterização do resíduo formado sobre o cupom;
- Permite a verificação de camada protetora sobre o cupom (filme ou óxido).

Limitações da Técnica:

- Tempo de exposição longo;
- A taxa de corrosão calculada é um valor médio para o período exposto;
- Para sistemas com diferentes fluidos ou com variação de parâmetros operacionais a taxa de corrosão calculada não dá o indicativo da situação mais agressiva;
- Os dados de corrosão são históricos e fornecem informações de desempenho do passado e geralmente não podem fornecer dados de curtos períodos de tempo ou dar respostas rápidas.
- Necessita introduzir sondas no equipamento.
- É uma técnica intrusiva.

3.2.2

SONDAS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A técnica de resistência elétrica é uma das técnicas mais empregadas para medir de taxas de corrosão depois dos cupons de perda de massa. É muito empregada em meios onde não existe a presença de uma fase aquosa contínua como, por exemplo, em oleodutos e gasodutos.

Algumas aplicações típicas são:

- Oleodutos, gasodutos e minerodutos;
- Unidades de processamento de petróleo e petroquímica;
- Sistemas de água.

As sondas podem ser consideradas como sondas de perdas de massa automáticas, fornecendo dados de perda de metal continuamente.

O monitoramento contínuo da corrosão com sondas de resistência elétrica fornece a tendência da taxa de corrosão em função do tempo, permitindo identificar com clareza os períodos de aumento ou redução da corrosividade do meio associado às variáveis do processo (vazão, temperatura, pressão, aumento da concentração de agentes corrosivos etc.). Não podem mostrar mudanças de

corrosividade nos fluidos ou taxas de corrosão em intervalos de tempo muito pequenos. A quantidade de leituras diárias (aquisição de dados) normalmente pode ser ajustada, variando em função da taxa de corrosão esperada e outras características do processo. Notar que uma quantidade maior de leituras por dia pode consumir mais energia (relevante se o sistema for alimentado por bateria) e armazenamento (no caso de utilização de estações de armazenamento de dados – data logger); o que irá requerer um maior número de visitas aos pontos de monitoramento para troca de bateria, coleta de dados e limpeza da memória dos registradores.

A técnica de resistência elétrica é o método por meio do qual a medição da taxa de corrosão é realizada a partir da variação da área, provocada pela corrosão, da seção transversal do elemento sensor exposto ao meio e que ocasiona variação na resistência elétrica deste sensor.

O desgaste da área exposta reduz a seção transversal do sensor; logo a perda de seção faz com que a resistência elétrica do metal varie, aumentando em função da redução da área. Este método está fundamentado na equação a seguir:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Onde:

R = resistência (ohm);

l = comprimento (cm);

A = área seção transversal (cm²);

ρ = resistividade do material (ohm. cm).

Neste método, o provador é colocado no meio corrosivo e a evolução da corrosão é realizada por um circuito baseado na Ponte de Kelvin. O elemento resistor é o sensor, que tem a variação da resistência medida contra um resistor referente que também está imerso no meio corrosivo, no entanto, encapsulado. O fato de o elemento de referência estar à mesma temperatura do elemento sensor elimina o efeito de variação de temperatura.

As variações da resistência elétrica são, então, medidas cumulativamente ao longo do tempo, tendo-se como base a medida de resistência inicial do sensor.

Na prática, os equipamentos empregados fazem a conversão automática da resistência, em perda de seção do elemento sensor, e esta medida se baseia em corrosão uniforme.

O método de resistência elétrica pode ser usado em qualquer tipo de meio para determinação da taxa de corrosão uniforme, porém seus resultados só são significativos para a média da perda de massa do sensor, não sendo possível a leitura da taxa de corrosão instantânea.

O método é susceptível à influência de fontes de ruído térmico e elétrico, tais como fontes de alimentação, motores elétricos e transmissões de rádio.

A aquisição de dados pode ser realizada nas seguintes formas:

- Coleta manual no local;

- Os dados coletados podem ser armazenados em uma estação coletora de dados (*logger*) para posterior resgate das informações;
- Transmissão imediata em tempo real (*on-line*), via satélite, rádio ou outra forma.

Vantagens da Técnica:

- Pode ser utilizada em qualquer meio;
- Calcula taxa de corrosão em pequeno espaço de tempo e os dados podem ser transferidos em tempo real (*on-line*);
- Técnica sensível a mudanças operacionais e regimes de fluxos, desde que não ocorram em muito curto espaço de tempo;
- Através do perfil da taxa e perda de metal podemos atuar nas variáveis de processo para minimizar a corrosão;
- Taxa de corrosão pode ser calculada em períodos de tempo desejado.

Limitações da Técnica:

- Método pouco sensível à corrosão localizada;
- Material de fabricação do sensor é limitado a uma pequena gama de materiais;
- Vida útil do sensor dependente da sensibilidade (quanto mais sensível o sensor, menor sua vida útil);
- Quando utilizada em meios onde possa ocorrer a formação de depósitos condutores (como os de sulfeto de ferro) distorce-se os resultados. Como a técnica mede a perda de espessura do material, a deposição de camadas condutoras ou semicondutoras e o recobrimento do sensor alteram a leitura de resistência e, conseqüentemente, a medida de perda de massa;
- O uso de provadores em meios ácidos contendo H_2S não é muito recomendado devido à possibilidade de depósitos condutores de sulfeto de ferro.
- Necessita introduzir sondas no equipamento
- É uma técnica intrusiva.

3.2.3 SONDAS DE RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO LINEAR

Esta técnica é de tempo real e o seu princípio fundamental é a aplicação de uma pequena voltagem (ou polarização) a um eletrodo imerso em um eletrólito.

A corrente necessária para manter um deslocamento específico do potencial de repouso (potencial de corrosão), por exemplo, 10mV, está diretamente relacionada à corrosão na superfície do eletrodo imerso no eletrólito.

Desse modo, medindo-se esta corrente determina-se velocidade de corrosão que esteja ocorrendo na superfície do eletrodo.

A técnica de resistência à polarização linear é particularmente útil em sistemas aquosos, uma vez que a presença de eletrólitos é fundamental. Este método permite identificar um descontrole no processo corrosivo, possibilitando ações imediatas no sentido de controlá-lo. Possibilitando um monitoramento contínuo (*on-line*) do processo.

Algumas aplicações típicas são:

- Sistemas de água de resfriamento;
- Sistemas de recuperação secundária na produção de petróleo;
- Sistemas de tratamento e distribuição de água potável;
- Sistemas de tratamento de efluentes e esgotos.

Os instrumentos disponíveis comercialmente usam medidas de resistência de polarização linear para obter a resistência de polarização e determinar a densidade de corrente de corrosão.

O método de Resistência de Polarização Linear é aplicável para obtenção de taxas de corrosão uniformes e é particularmente útil para acompanhamento de inibidores e métodos de modificação de meios corrosivos.

As sondas corrosimétricas de polarização linear estão disponíveis em dois ou três eletrodos.

Vantagens da Técnica

- O método de Resistência de Polarização Linear é uma técnica prática que pode ser usada com vantagens no laboratório e no campo;
- Permite rapidez na determinação da taxa de corrosão e a sensibilidade para detectar pequenas variações no meio corrosivo, tais como mudança de pH, variação na concentração de inibidor etc.
- Exposição do corpo-de-prova a uma pequena variação de potencial, não havendo alteração substancial de sua superfície, permitindo que a corrosão seja avaliada de forma contínua por período longo.

Desvantagens da Técnica

- Empregada somente em meios condutores de eletricidade (eletrólito)
- Técnica mais adequada para determinação de corrosão generalizada, fornecendo, portanto, pouca ou nenhuma informação sobre corrosão localizada;
- Fornece informação qualitativa, pois as taxas de corrosão medidas podem apresentar erros significativos em relação ao valor real, principalmente em meios de alta resistividade.
- Necessita introduzir sondas no equipamento

3.2.4

CORRENTES GALVÂNICAS

As sondas galvânicas são constituídas de dois eletrodos de materiais dissimilares expostos ao fluxo do processo. Quando imersos em soluções, existe uma diferença de potencial natural entre o par de eletrodos.

A corrente gerada devido a esta diferença de potencial está relacionada à taxa de corrosão que está ocorrendo no eletrodo mais ativo (anodo).

Normalmente, dois eletrodos tipo pino, um dos quais é o aço carbono e o outro latão, são usados.

A técnica de correntes galvânicas tem sido amplamente aplicada em sistemas de injeção de água

onde a concentração de oxigênio dissolvido é uma preocupação fundamental. A entrada de oxigênio em tais sistemas aumenta consideravelmente as correntes galvânicas devido ao seu efeito nas reações catódicas e consequentemente produz um aumento da taxa de corrosão.

Esta técnica, não permite a medição da corrosão, mas serve como uma indicação da presença de espécies oxidantes no sistema. Sondas corrosimétricas galvânicas têm mostrado uma resposta muito boa à presença de oxigênio dissolvido no sistema e, relativamente a isto, é uma ferramenta valiosa para detectar a entrada de oxigênio. Estas sondas são especialmente úteis quando investigando, otimizando ou auxiliando na detecção de problemas em sistemas de injeção de água do mar como também no monitoramento de sistemas de alta pressão.

As sondas corrosimétricas galvânicas podem também monitorar a atividade de bactérias causadoras de despolarização catódica.

Vantagens da Técnica

- Aparato instrumental simples;
- Serve como um bom indicador da presença de espécies oxidantes no sistema, por exemplo, oxigênio dissolvido.

Desvantagens da Técnica:

- Somente aplicada em meios condutores de eletricidade (eletrólitos);
- Necessita introduzir sondas no equipamento;
- Não funciona bem em meios com sulfeto. H_2S polariza anodicamente o sensor de latão;
- Formação de depósitos torna a resposta muito lenta;
- Não indica a taxa de corrosão. Mostra apenas a presença de compostos oxidantes.

3.2.5

PERMEADORES OU PROVADORES DE HIDROGÊNIO

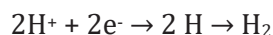
São sondas que utilizam da pressão parcial exercida pelo hidrogênio gerado e acumulado em uma falha para avaliar a fragilização pelo hidrogênio.

A corrosão do aço em ambientes ácidos, não aerados produz hidrogênio atômico. O hidrogênio atômico gerado em áreas catódicas do metal corroído normalmente se recombina para formar hidrogênio molecular.

Determinados íons tais como: os íons sulfeto, cianeto ou antimônio, retardam a formação do hidrogênio molecular e uma porção do hidrogênio gerado na superfície é introduzida no metal.

O hidrogênio, na forma atômica, apresenta dimensões tão reduzidas que facilmente penetra e se difunde na estrutura cristalina dos metais. A sua presença na rede cristalina vai traduzir-se numa degradação das propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal, tal fenômeno é denominado fragilização pelo Hidrogênio.

O hidrogênio é um intermediário da reação de redução do H^+ que acompanha um processo de corrosão:



O ácido sulfídrico (H_2S) é especialmente perigoso, pois não só fornece o íon sulfeto, como também fornece o H^+ . O hidrogênio pode também penetrar no metal a partir de atmosferas ricas em hidrogênio, por exemplo, durante tratamentos térmicos ou soldagens.

Quando o hidrogênio atômico se acumula em certas zonas do metal (normalmente correspondente a heterogeneidades), a sua concentração pode ser suficiente para se combinar em hidrogênio molecular (gasoso) que se acumula em bolsas.

Criam-se então falhas internas que afetam a continuidade do metal e atuam como criadoras e acumuladoras de tensões internas. Também no caso de metais contendo uma fase não-metálica dispersa, a presença do hidrogênio pode conduzir à formação de produtos gasosos que se acumulam em bolsas. Nestes casos fala-se de fragilização irreversível, porque não pode ser posteriormente eliminada.

O ensaio de permeação de hidrogênio tem grande importância em atividades de avaliação e seleção de materiais para uso em presença de H_2S . São utilizados também em sistemas de monitoramento de corrosão nos quais se busca avaliar em tempo real a quantidade de hidrogênio que permeia através das paredes de tanques, vasos de pressão ou dutos.

Vantagens da Técnica:

- Técnicas que não necessita introduzir sensores no equipamento, o sensor é colocado na parede do equipamento.
- Técnica que permite verificar e quantificar os fenômenos de fragilização pelo hidrogênio;
- Pode ser utilizada em qualquer tipo de fluido.

Desvantagens da Técnica:

- Especifica somente para monitoramento da permeação de hidrogênio, portanto não avalia taxa de corrosão.

3.2.6

FERRAMENTAS INSTRUMENTADAS PARA INSPEÇÃO INTERNA DE DUTOS E FUNDO DE TANQUES APOIADOS NO SOLO

São equipamentos que utilizam o princípio de medição da variação do fluxo magnético em um material metálico ou por meio de ultrassom.

Os *pigs* instrumentados (*ILIT – In Line Inspection Tool*) são ferramentas que se deslocam impulsionadas por um fluido ao longo de um duto e determina perdas de espessura, moissas e ovalização do tubo. É um recurso essencial na verificação se as práticas de proteção estão dando resultados satisfatórios.

As ferramentas para avaliação de integridade de fundo de tanques (*TBIT – Tanque Botton Inspection Tool*) deslocam-se em todo o fundo e determina perdas em função de corrosão, principalmente na face externa não acessível. É igualmente um recurso essencial na verificação se as práticas de proteção estão dando bons adequados.

3.3 AVALIAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO

Com o uso das técnicas de monitoração, especialmente por cupom de perda de massa, sonda de resistência elétrica e pigs instrumentados (no caso de dutos) recomenda-se que o usuário estabeleça critérios com os níveis de taxas de corrosão adequados às suas necessidades, de acordo com a tabela 01.

**Tab. 01 – Classificação das Taxas de Corrosão
(Extraído da Recomendação Prática SP – 0775 - 2023)**

Taxa Média de Corrosão Uniforme		Taxa Máxima de Pites
Classificação	mm/ano	mm/ano
Baixa	≤ 0,05	≤ 0,13
Moderada	0,05 a 0,20	0,13 a 0,30
Alta	> 0,20	> 0,30

3.4 MONITORAÇÃO E CONTROLE DA CORROSÃO INTERNA EM TANQUES DE ARMAZENAMENTO TERRESTRES, TANQUES DE LASTRO DE NAVIOS, DE FPSO E TANQUES DE ÁGUA PRODUZIDA

O controle da corrosão interna de tanques terrestres de armazenamento de petróleo, de água, e sistemas marítimos de lastro, de cargas de petróleo em navios e em FPSO (Unidades flutuantes de Produção e Estocagem de Petróleo) deve ser realizado por inspeções visuais e fotográficas quando das paradas para inspeção, em geral a cada dez anos nos terrestres e cinco anos nos marítimos.

Nestas inspeções deve-se avaliar o revestimento interno e o sistema de proteção catódica galvânica, preparando-o para mais uma campanha.

4.0 RECOMENDAÇÕES PARA MONITORAÇÃO DA EFICÁCIA DA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA EXTERNA

A monitoração da corrosão externa de estruturas metálicas aéreas, de estruturas enterradas e de estruturas submersas é realizada indiretamente pela eficácia da proteção anticorrosiva.

4.1 PARA ESTRUTURAS AÉREAS PROTEGIDAS POR REVESTIMENTO

Para estruturas aéreas as principais práticas de proteção normalmente aplicadas são revestimentos por metalização (aspersão térmica), revestimentos por galvanização a quente e pintura anticorrosiva, com aplicação dos principais documentos normativos de referência citados no item 2.0.

O controle da corrosão deve ser realizado por inspeções visuais e fotográficas, pelo menos semestrais com resultados apresentados em relatórios que exprimem o grau de proteção e auxiliam no planejamento de futuras intervenções, servindo também para avaliação em casos de garantia.

Especial atenção deve ser dispensada às condições críticas (condições especiais) geradoras de frestas tais como: flanges, parafusos, apoios de tubulações, soldas interrompidas, ligações aparafusadas (talas de junção), apoios de estruturas, dentre outras.

Recomenda-se que o usuário estabeleça critérios com os níveis de deterioração adequados às suas necessidades, de acordo com os aspectos de Falhas (F) em serviço colocados a seguir:

4.1.1

F0 - SEM FALHAS

Revestimento sem falhas – superfície adequadamente protegida contra corrosão.



Galvanizado sem Falhas



Pintura sem Falha

4.1.2

F1 – FALHAS POUCO SIGNIFICATIVAS

Área total ou parcial com alguns pontos de oxidação, existência de corrosão branca em galvanizados com mais de um ano em serviço e predominantemente presença de revestimento em bom estado. Deve-se acompanhar com atenção para definir melhorias.



Galvanizado com Início de Perda de Passivação e Corrosão Branca



Pintura com Início de Falha

4.1.2.1 F2 – Oxidação generalizada

Área total ou parcial com vários pontos de oxidação mais concentrados e com pouca existência de revestimento em bom estado. Recomendação: reforçar o revestimento, assim que possível.



Galvanizado com Oxidação Generalizada



Pintura com Falha Generalizada

4.1.3 F3 – OXIDAÇÃO COMPLETA

Área total ou parcial com oxidação completa e perda total do revestimento, mas sem perda de material ferroso. Recomendação: refazer o revestimento, o mais rápido possível.



Galvanizado com Deterioração Generalizada e Severa



Pintura com Deterioração Severa

4.1.4 F4 – OXIDAÇÃO COMPLETA COM PERDA DE MATERIAL

Perda de material ferroso, presença de alvéolos ou aumento de diâmetro no caso de cabos. Recomendação: refazer o revestimento o mais rápido possível.



Oxidação Completa com Perda de Material



Pintura com Deterioração Completa e Perda de Material

4.1.5

F5 – OXIDAÇÃO COMPLETA COM GRANDE PERDA DE MATERIAL

Perda significativa de material ferroso, apresentando rachaduras ou grandes alvéolos, ou ainda aumento acentuado de diâmetro no caso de cabos. Recomendação: perda de seção superiores a 10% exigem análise criteriosa sobre a necessidade de substituição imediata por perda de integridade.



Galvanização com Grande Perda de Material



Pintura com Perda de material

Recomendação: perda de seção superiores a 10% exigem análise criteriosa sobre a necessidade de substituição imediata por perda de integridade.

4.2 **PARA ESTRUTURAS AÉREAS DE CONCRETO**

As estruturas aéreas de concreto devem ser inspecionadas de acordo com a Recomendação Prática ABRACO RP –CAC – 001 - Corrosão de Armaduras em Estruturas de Concreto - Causas Recomendações de Avaliação, Diagnóstico, Prevenção e Controle.

4.3 **PARA ESTRUTURAS METÁLICAS ENTERRADAS OU APOIADAS NO SOLO**

As principais práticas de proteção que podem ser aplicadas a estas estruturas são os revestimentos e os sistemas de proteção catódica com a utilização dos principais documentos normativos de referência citados no item 2.0.

Os sistemas de proteção catódica devem ser inspecionados periodicamente de acordo com as Recomendação Prática da ABRACO - RP – PTC – 005: Recomendações para Inspeção de Sistemas de Proteção Catódica Terrestres

A monitoração de falhas de revestimento, para o caso específico de dutos poderá ser realizada com a aplicação das técnicas de inspeção aplicáveis à avaliação do revestimento (mapeamento de correntes) e as aplicáveis à avaliação do revestimento e proteção catódica (potencial passo-a-passo, DCVG ou combinação dos dois métodos)

Para outras estruturas a monitoração se faz pelos potenciais eletroquímicos após a aplicação de proteção catódica.

Os potenciais de proteção para as estruturas em geral devem ser colocados em níveis mais negativo que -0,85 V em relação ao eletrodo de Cu/CuSO₄.

Para os dutos devem ser observados os critérios da norma ABNT ISO 15589 – Indústria de Petróleo, Petroquímica e Gás Natural – Proteção Catódica de Sistemas de transporte por Dutos – Parte I– Dutos Terrestres

Para estruturas de concreto devem ser observados os critérios da futura norma ABNT para proteção catódica de estruturas de concreto (em fase de consulta pública).

Os sistemas de proteção catódica devem ser mantidos em permanente funcionamento, por esta razão é fundamental que se faça o constante monitoramento dos retificadores e sistemas de drenagem elétrica, bem como dos potenciais de pontos de teste estratégicos.

Antes do desenvolvimento das tecnologias de monitoração o acompanhamento dos sistemas de proteção catódica só podia ser feito através de inspeção presencial, implicando em custos elevados e detecção tardia de falhas nos equipamentos, o que comprometia singularmente a efetividade dos sistemas de proteção catódica.

Com a introdução da monitoração remota no acompanhamento dos sistemas de proteção catódica tivemos o primeiro grande avanço no gerenciamento desses sistemas, tanto em termos de custos como de confiabilidade, pois reduziu significativamente a necessidade de inspeções físicas, possibilitou o acompanhamento diário dos potenciais estrutura/eletrolito e agilizou a detecção de falhas nos retificadores e equipamentos de drenagem elétrica.

Entretanto, o gerenciamento e ajuste desses sistemas continuou totalmente dependente da ação direta dos seus gestores e técnicos de proteção catódica. No caso de tubulações sujeitas a correntes de interferência dinâmicas, cujas condições variam significativamente tanto em intensidade como em distribuição, o gerenciamento dos sistemas de proteção catódica pode se tornar bastante complexo, exigindo uma elevada capacitação dos profissionais responsáveis pelo seu acompanhamento, assim como uma atuação intensa por parte deles.

Mais recentemente, com a introdução de tecnologias avançadas como o tratamento de grandes volumes de dados (big data) e inteligência artificial, a monitoração dos sistemas de proteção catódica está passando por uma verdadeira revolução, com utilização do gerenciamento inteligente de sistemas de proteção catódica, que utiliza algoritmos especialmente desenvolvidos para acompanhar e ajustar os retificadores de proteção catódica, utilizando equipamentos preparados para o ajuste à distância.

Os sistemas inteligentes atuais permitem inclusive ajustar os retificadores com base em potenciais estrutura/eletrólito medidos em pontos de teste remotos, assim como atuar de forma automática no ajuste de outros retificadores para compensar a falha de um determinado retificador.

4.4 PARA ESTRUTURAS SUBMERSAS

As principais práticas de proteção que podem ser aplicadas a estas estruturas são os revestimentos e os sistemas de proteção catódica com a utilização dos principais documentos normativos de referência citados no item 2.0.

Os sistemas de proteção catódica devem ser inspecionados periodicamente de acordo com a Recomendação Prática da ABRACO RP – PTC – 006 - Critérios para Sistemas de Proteção Catódica em Estruturas Marítimas.

Para estacas metálicas de píeres, cais e plataformas é comum aplicar somente proteção catódica.

Os potenciais de proteção para as estruturas submersas devem ser colocados em níveis mais negativo que -0,80 V em relação ao eletrodo de Ag/AgCl.

Para estruturas de concreto devem ser observados os critérios da futura norma ABNT para proteção catódica de estruturas de concreto (em fase de consulta pública).

5.0 CONCLUSÕES

Com o conhecimento que se tem na atualidade é possível manter os ativos de qualquer empresa totalmente livres de processos corrosivos, para isto as empresas devem investir na capacitação de seus colaboradores para que possam definir as estratégias mais adequadas aos objetivos da instituição.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Nunes, Laerce P. – Fundamentos de Resistência à Corrosão – Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2ª edição 2025.
- Gentil, Vicente – Corrosão, 7ªed. LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora, 2022.

- Fragata, Fernando L. – Pintura Anticorrosiva: Falhas e Alterações nos Revestimentos, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2016
- Nunes, Laerce P. – Materiais – Aplicações de Engenharia – Seleção e Integridade – Editora Interciência, Rio de Janeiro
- Nunes, Laerce P. e Lobo, Alfredo O. – Pintura Industrial na Proteção Anticorrosiva Interciência, Rio de Janeiro, 5ª Edição.
- DUTRA, A. C. & NUNES, L. P. - Proteção Catódica - Técnica de Combate à Corrosão 5ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011.
- IEC - Sistemas de Proteção Catódica, 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência – 2020.