

Proteção Catódica

ter, visando a combinar a elevada resistência química do PVC com a grande resistência mecânica da fibra de vidro com poliéster.

Evidentemente os plásticos ou plásticos reforçados com fibras de vidro, devido à sua natureza química e dielétrica, não sofrem deterioração por processo eletroquímico, mas podem sofrer deterioração por:

- processos químicos como oxidação a ligações químicas e como hidrólise em que ocorre ataque nas ligações éster;
- degradação térmica podendo ocasionar despolimerização ou carbonização;
- ação de solventes e de radiações eletromagnéticas.

Como resultado da deterioração o material pode-se tornar mole, quebradiço, podendo aparecer delaminações, inchamento, bolhas, trincas etc.

BIBLIOGRAFIA

- 1 WESTCHESTER, J., "Painting Corroded Steel Surfaces", Metal Finishing, Dezembro 1966.

A proteção catódica é uma técnica que está sendo aplicada com sucesso no mundo inteiro, e cada vez mais no Brasil, para combater a corrosão das instalações metálicas enterradas, submersas e em contato com eletrólitos.

Seu conhecimento torna-se cada vez mais necessário aos engenheiros e técnicos, de um modo geral, devido à construção cada vez maior de oleodutos, gasodutos, tubulações que transportam derivados de petróleo e produtos químicos, adutoras, minerdutos, redes de água para combate a incêndio, emissários submarinos, estacas de pieres de atracação de navios, cortinas metálicas para portos, plataformas submarinas de prospecção e produção de petróleo, camisas metálicas para poços de água e de petróleo, navios e embarcações, equipamentos industriais, tanques de armazenamento de água, de óleo, de derivados de petróleo e de produtos químicos, cabos telefônicos com revestimentos metálicos, estacas metálicas de fundação e muitas outras instalações importantes.

Com a utilização da proteção catódica consegue-se manter essas instalações metálicas completamente livres da corrosão por tempo indeterminado, mesmo que não seja aplicado sobre suas superfícies nenhum tipo de revestimento e que as condições agressivas do meio (solo, água ou outro eletrólito) sejam extremamente severas. A grande virtude dessa técnica é permitir o controle seguro da corrosão em instalações que, por estarem enterradas ou imersas, não podem ser inspecionadas ou revestidas periodicamente, como acontece com as estruturas metálicas aéreas.

Embora a proteção catódica possa ser utilizada com eficiência para a proteção de estruturas metálicas completamente nuas, sua aplicação torna-se extremamente econômica e mais simples quando as superfícies a proteger são previamente revestidas. Sua finalidade, nesses casos, consiste em complementar a ação protetora dos revestimentos que, por melhor e mais bem aplicados que sejam, sempre contêm poros, falhas e se tornam deficientes com o passar do tempo. A proteção catódica e o revestimento são, assim, aliados importantes que, de maneira econômica e segura, garantem a integridade ao longo dos anos das estruturas metálicas ou submersas que representam um patrimônio valioso.

24.1 MECANISMO

O mecanismo de funcionamento da proteção catódica é extremamente simples, embora a sua aplicação, na prática, exija bastante experiência por parte do projetista e do instalador do sistema.

O processo corrosivo de uma estrutura metálica enterrada ou submersa se caracteriza sempre pelo aparecimento de áreas anódicas e catódicas na superfície do material metálico, com a consequente ocorrência de um fluxo de corrente elétrica no sentido convencional, das áreas anódicas para as áreas catódicas através do eletrólito, sendo o retorno dessa corrente elétrica realizado por intermédio do contato metálico entre essas regiões. A ocorrência dessas áreas de potenciais diferentes ao longo de uma tubulação de aço ou de uma chapa metálica mergulhada em um eletrólito como o solo ou a água tem sua explicação nas variações de composição química do metal, na presença de inclusões não-metálicas, nas tensões internas diferentes causadas pelos processos de conformação e soldagem do material metálico etc. A Fig. 24.1 indica a ocorrência dessas áreas em uma tubulação enterrada.

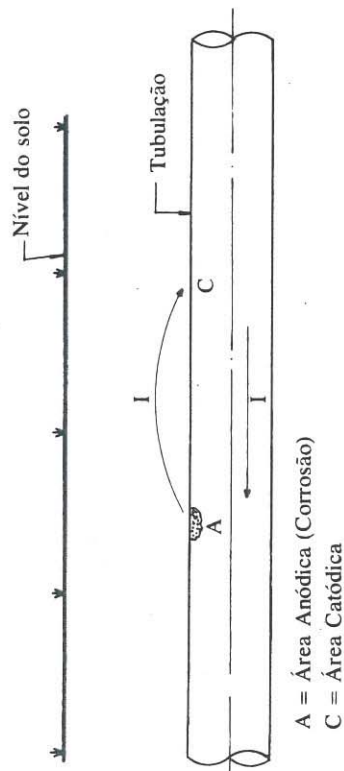


Fig. 24.1 Áreas anódica e catódica em uma tubulação metálica enterrada.

As heterogeneidades do solo, em conjunto com as heterogeneidades existentes no material metálico, agravam os problemas de corrosão, uma vez que tais variações (resistividade elétrica, grau de aeração, composição química, grau de umidade e outras) dão origem, também, a pilhas de corrosão severas nas superfícies dos materiais metálicos enterrados. Dentre essas variações, as que causam problemas mais severos são as que dizem respeito às resistividades elétricas e ao teor de oxigênio, como esquematizado nas Figs. 24.2 e 24.3.

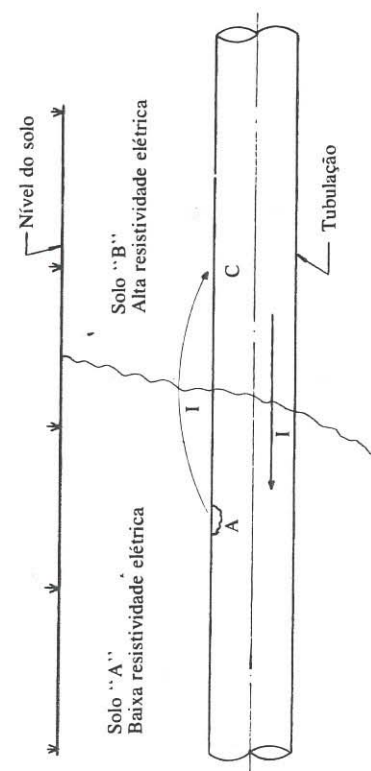


Fig. 24.2 Pilha de corrosão causada pela variação da resistividade elétrica do solo.

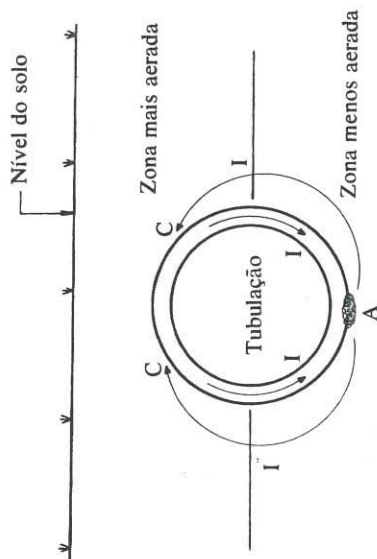


Fig. 24.3 Pilha de corrosão causada pela variação do grau de aeração do solo.

Pela natureza eletroquímica da corrosão verifica-se que há um fluxo de corrente através do eletrólito e do metal, de tal maneira que os cátions saem do anodo para a solução ao mesmo tempo em que os elétrons se dirigem do anodo para o catodo seguindo o circuito metálico, conforme a Fig. 24.4.

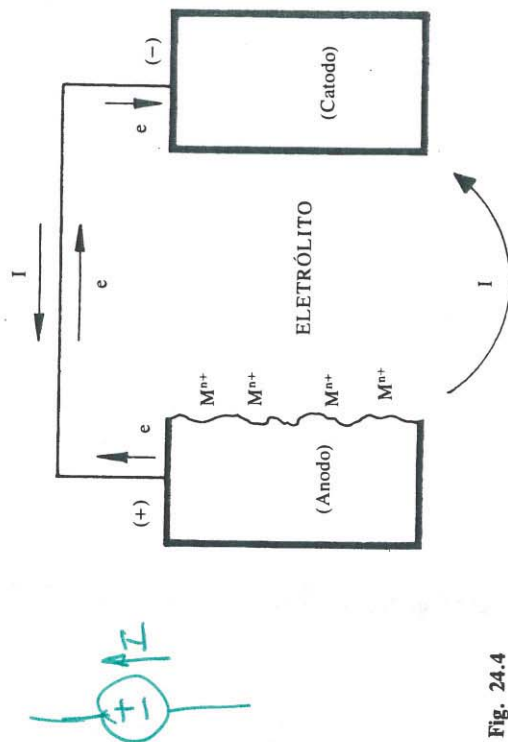


Fig. 24.4

A taxa de corrosão depende então da intensidade da corrente que flui no sistema, dependendo dessa intensidade da força eletromotriz total da pilha formada e das várias resistências ôhmicas e não-ôhmicas do circuito.

Proteger catodicamente uma estrutura significa eliminar, por processo artificial, as áreas anódicas da superfície do metal fazendo com que toda a estrutura adquira comportamento catódico. Como consequência, o fluxo de corrente elétrica anodo/catodo deixa de existir e a corrosão é totalmente eliminada.

Se um novo circuito for estabelecido (Fig. 24.5), compreendendo um bloco metálico (C) imerso no eletrólito e uma fonte de força eletromotriz com o pólo positivo ligado a (C)

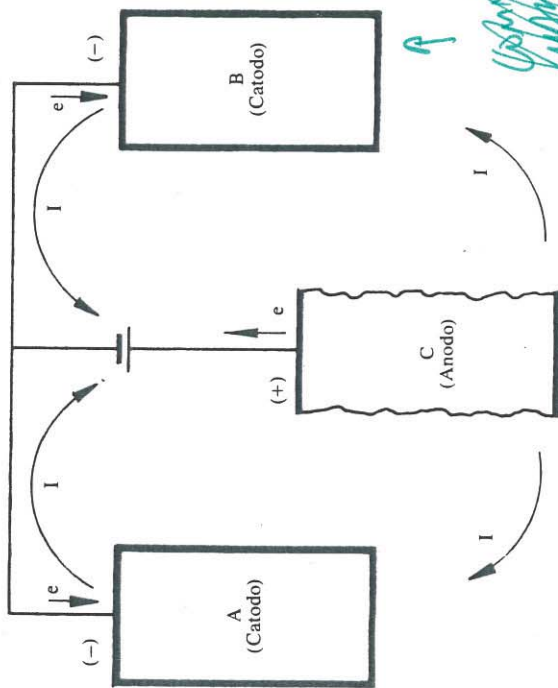


Fig. 24.5

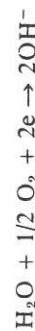
e o pólo negativo ligado a (A) e (B), tornando-os, assim, mais negativos por causa dos elétrons que escorrem por eles para o eletrólito, conseqüentemente funcionam como catodo e ficam, portanto, protegidos.

São três os mecanismos que podem ocasionar a redução da corrosão quando se aplica a proteção catódica:

— o potencial do metal atinge um valor tal que, em todas as áreas do metal, só ocorre um processo catódico, isto é, impede-se a reação



— o eletrólito adjacente à superfície metálica se torna mais básico devido à redução dos íons hidrogênio, H^+ , ou redução do oxigênio



No caso de materiais metálicos ferrosos a elevação do valor de pH, devido à formação de OH^- pode servir de inibição para a corrosão;

— a elevação do pH pode acarretar a precipitação de substâncias insolúveis, como $CaCO_3$ e $Mg(OH)_2$, que podem depositar-se sobre o metal produzindo camada protetora.

Para comprovação do evidenciado na Fig. 24.5, pode-se realizar a Experiência 24.1.

Experiência 24.1

Adicionar a um bécher de 250 ml, 200 ml de solução aquosa a 3% de NaCl, 1 ml de solução aquosa-alcoólica de fenolftaleína e 2 ml de solução aquosa N (normal) de ferricianeto de potássio. Imergir três eletrodos metálicos, sendo um de cobre, outro de ferro e o terceiro de zinco, ligando-os por meio de um fio de cobre ou outro condutor, como mostra a Fig. 24.6. Decorridos alguns minutos notar-se-á coloração róseo-avermelhada em torno dos eletrodos de cobre e de ferro e resíduo esbranquiçado em torno do eletrodo de zinco.

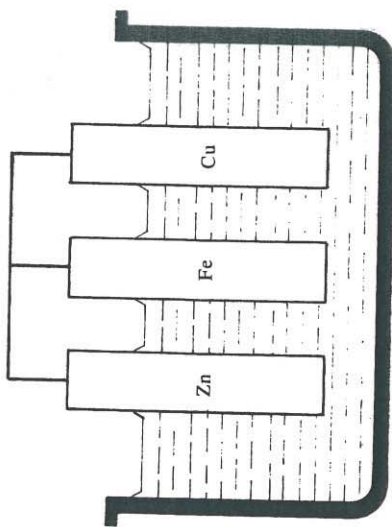


Fig. 24.6

Pelas observações feitas se comprovou que:

- o ferro e o cobre não sofreram corrosão, pois se isto tivesse ocorrido notar-se-ia a formação de resíduo azul, de $Fe_3[Fe(CN)_6]_2$, em torno do ferro, ou resíduo castanho, de $Cu_2[Fe(CN)_6]_2$, em torno do cobre;
- o ferro e o cobre funcionaram como catodo: em torno dos mesmos se verificou a coloração rósea que é característica de meio básico ou alcalino;
- o zinco funcionou como anodo, oxidando-se e formando o resíduo esbranquiçado de $Zn(OH)_2$.

24.2 MÉTODOS DE PROTEÇÃO CATÓDICA

Para a obtenção da proteção catódica dois métodos são utilizados, ambos baseados no mesmo princípio de funcionamento, que é o de injeção de corrente elétrica na estrutura através do eletrólito:

- proteção catódica galvânica ou por anodos galvânicos ou de sacrifício;
- proteção catódica por corrente impressa ou forçada.

24.2.1 Proteção catódica galvânica

Neste processo o fluxo de corrente elétrica fornecido origina-se da diferença de potencial existente entre o metal a proteger e outro escolhido como anodo e que ocupa uma posição mais elevada na tabela de potenciais, conforme pode ser observado na série galvânica prática mostrada na Tabela 24.1.¹

Os materiais utilizados na prática como anodos galvânicos são ligas de magnésio, zinco ou alumínio. Esses anodos devem satisfazer a certas exigências, tais como:

- bom rendimento teórico da corrente em relação às massas consumidas;
- a corrente não deve diminuir com o tempo (formação de películas passivantes);
- o rendimento prático da corrente não deve ser muito inferior ao teórico.

A Tabela 24.2 mostra as composições químicas recomendadas para os anodos de zinco (segundo a especificação americana M11-A-18(M1H) magnésio e alumínio

Tabela 24.1 Série galvânica prática

Material	Volt*
Magnésio comercialmente puro	-1,75
Liga de magnésio (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	-1,60
Zinco	-1,10
Liga de alumínio (5% Zn)	-1,05
Alumínio comercialmente puro	-0,80
Aço (limpo)	-0,50 a -0,80
Aço enferrujado	-0,20 a -0,50
Ferro fundido (não-grafitizado)	-0,50
Chumbo	-0,50
Aço em concreto	-0,20
Cobre, bronze, latão	-0,20
Ferro fundido com alto teor de silício	-0,20
Aço com carepa de laminação	-0,20
Carbono, grafite, coque	+0,30

* Potenciais típicos normalmente observados em solos neutros e água, medidos em relação ao eletrodo de Cu/CuSO₄. Valores um pouco diferentes podem ser encontrados em diferentes tipos de solos.

Tabela 24.2 Composição química típica para anodos galvânicos (% em peso)

Metal	Liga de Zn	Liga de Mg	Ligas de Al
Zinco	Balanço	0,35-0,50	5,0
Alumínio	0,1-0,5	Balanço	Balanço
Magnésio	—	—	0,80
Chumbo	0,006 (máx.)	—	—
Ferro	0,005 (máx.)	0,08 (máx.)	—
Cobre	0,005 (máx.)	0,006 (máx.)	—
Cádmio	0,05-0,15	—	0,01
Silício	0,135 (máx.)	0,11-0,21	—
Níquel	—	—	0,10 (máx.)
Manganês	—	—	—
Mercurio	—	0,035-0,50	—
Índio	—	—	0,02

Como é de fundamental importância a composição da liga para o bom desempenho do anodo galvânico, procura-se adicionar elementos para que o anodo apresente as características desejadas:

- potencial de corrosão suficientemente negativo: razão da adição de manganês nos anodos de magnésio;
- alta eficiência do anodo: não deve conter impurezas que possam originar autocorrosão ou torná-lo ineficiente. Daí se procurar, em todos os anodos, manter baixos teores de ferro: a presença de ferro, mesmo em quantidades menores que 0,001%, nos anodos de zinco, causa a formação de um revestimento denso sobre o zinco que inibe o fluxo da corrente. A adição de alumínio e cádmio ao zinco contrabalança o efeito, conforme dados confirmatórios apresentados por Ambler:² zinco com 2% de alumínio e 0,0015% de ferro é capaz de fornecer duas vezes mais ampère-hora, em um ano, do que zinco contendo somente 0,0015% de ferro sem alumínio;
- estado ativo para que o anodo seja corroído uniformemente, evitando que ocorra sua passivação: caso da adição de mercúrio ou de índio, em anodos de alumínio.

Tabela 24.3 Aplicações típicas dos anodos galvânicos

Anodos	Aplicações
Magnésio	Estruturas metálicas imersas em água doce, de baixa resistividade, ou enterradas em solos com resistividade elétrica até 3.000 Ω . cm.
Zinco	Estruturas metálicas imersas em água do mar ou enterradas em solos com resistividade elétrica até 1.000 Ω . cm.
Alumínio	Estruturas metálicas imersas em água do mar.

A utilização dos anodos é função das características da estrutura a proteger e do tipo de eletrólito em contato com o material metálico. A Tabela 24.3 apresenta aplicações típicas dos anodos galvânicos.

Para proteção de trocadores ou permutadores de calor, ou sistema que operam com água aquecida, é recomendável o uso de anodos de magnésio devido ao fato de que o zinco, embora normalmente anódico em relação ao ferro, pode sofrer inversão de polaridade e tornar-se, então, catódico em relação ao ferro, o que ocasionará corrosão do ferro.



Fig. 24.7 Anodo de Magnésio.

Pela análise da Tabela 24.3 verifica-se que os anodos galvânicos são utilizados, normalmente, para eletrólitos de muito baixa resistividade elétrica (até 3.000 Ω .cm), uma vez que as diferenças de potenciais em jogo são muito pequenas, necessitando de circuitos de baixas resistências elétricas para a liberação da corrente de proteção catódica. Pelo mesmo motivo a proteção catódica galvânica é mais recomendada, tanto técnica quanto economicamente, para estruturas metálicas que requerem pequenas quantidades de corrente, em geral até 5 A.

A Fig. 24.8 mostra, de forma esquemática, duas aplicações comuns dos anodos galvânicos.

Tabela 24.4 Aplicações típicas dos anodos inertes

Anodos	Aplicações
Grafite	Estruturas metálicas enterradas em solos ou imersas em água doce.
Ferro-Silício (14,5% Si)	Estruturas metálicas enterradas em solos ou imersas em água doce.
Ferro-Silício-Cromo (14,5% Si, 4,5% Cr)	Estruturas metálicas enterradas em solos com alto teor de cloretos e imersas em água do mar ou em água doce.
Chumbo-Antimônio-Prata (93% Pb, 6% Sb, 1% Ag)	Estruturas metálicas imersas em água do mar.
Tiânio platinizado e Tântalo ou Nióbio platinizados	Estruturas metálicas imersas em água do mar.

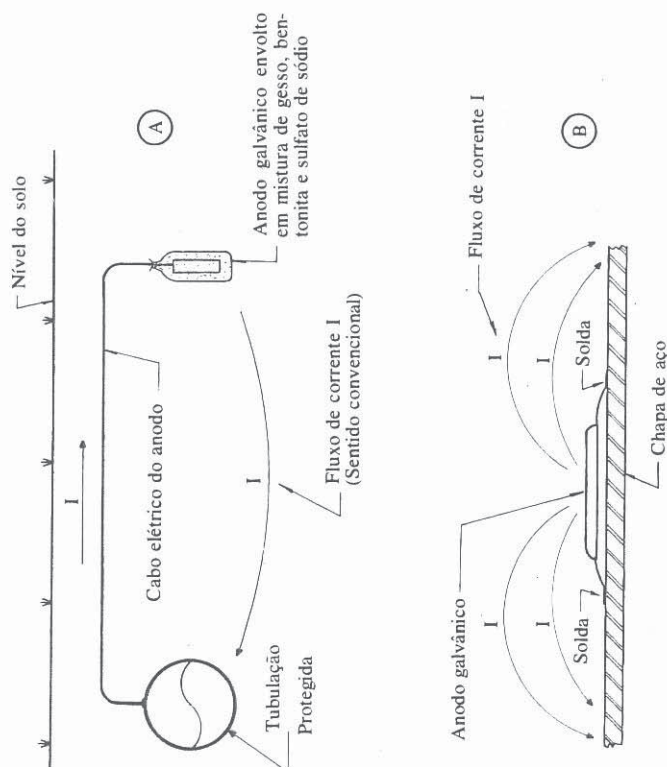


Fig. 24.8 Proteção catódica galvânica para uma tubulação enterrada (A) e para uma chapa de aço mergulhada em um eletrólito (B)

Quando os anodos de magnésio e zinco são enterrados no solo há necessidade de envolvê-los com um enchimento condutor (mistura de gesso, bentonita e sulfato de sódio) que possui as seguintes finalidades:

- melhorar a eficiência de corrente do anodo, fazendo com que o seu desgaste seja uniforme;
- evitar a formação de películas isolantes (fosfatos e carbonatos) na superfície do anodo;
- absorver umidade do solo;
- diminuir a resistência de aterramento, facilitando a passagem da corrente elétrica do anodo para o solo.

24.2.2 Proteção catódica por corrente impressa

Nesse processo o fluxo de corrente fornecido origina-se da força eletromotriz (f. e. m.) de uma fonte geradora de corrente elétrica contínua, sendo largamente utilizados na prática os retificadores que, alimentados com corrente alternada, fornecem a corrente elétrica contínua necessária à proteção da estrutura metálica.

Para a dispersão dessa corrente elétrica no eletrólito são utilizados anodos especiais, inertes, com características e aplicações que dependem do eletrólito onde são utilizados, conforme mostrado na Tabela 24.4.

A grande vantagem do método por corrente impressa consiste no fato de a fonte geradora (retificador de corrente) poder ter a potência e a tensão de saída de que se

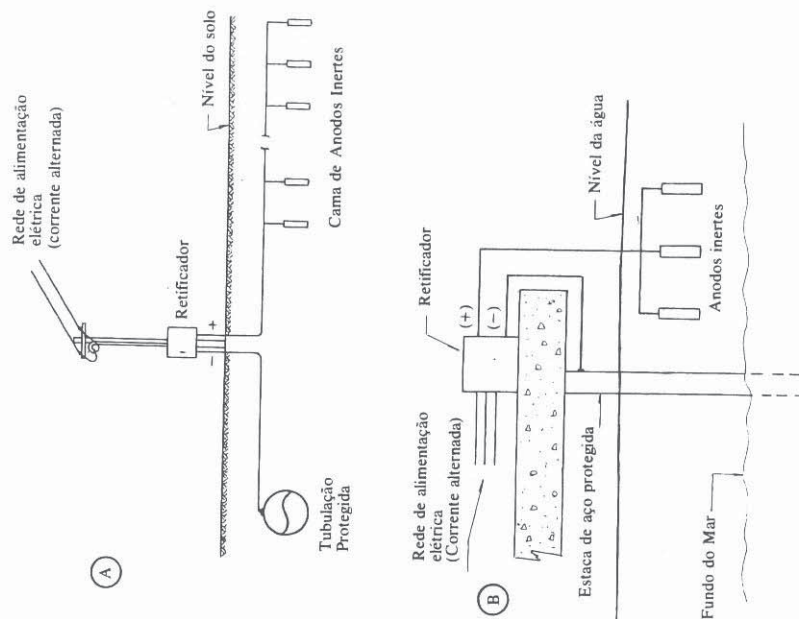


Fig. 24.9 Proteção catódica por corrente impressa para uma tubulação enterrada (A) e para uma estaca de pier de atração de navios (B).

necessite, em função da resistividade elétrica do eletrólito, o que leva a concluir que esse método se aplica à proteção de estruturas em contato com eletrólitos de baixa (3.000 a 10.000 Ω . cm), média (10.000 a 50.000 Ω . cm), alta (50.000 a 100.000 Ω . cm) e altíssima (acima de 100.000 Ω . cm) resistividade elétrica.

A Fig. 24.9 mostra, de forma simplificada, duas aplicações comuns dos sistemas por corrente impressa.

Quando os anodos inertes são enterrados no solo há necessidade, na maioria das vezes, de envolvê-los com um enchimento condutor de coque metalúrgico moído, com resistividade elétrica máxima de 100 Ω . cm, que possui as seguintes finalidades:

- diminuir a resistência de aterramento, facilitando a passagem da corrente elétrica do anodo para o solo;
- diminuir o desgaste do anodo, uma vez que com o enchimento condutor bem compactado a maior parte da corrente é descarregada diretamente do coque metalúrgico para o solo.

24.2.3 Reações envolvidas

As reações que se passam nos sistemas de proteção catódica são:

— galvânica

- área anódica



- área catódica
- aerada



- não-aerada



- corrente impressa ou forçada
- área anódica



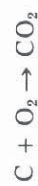
ou



Se o anodo não for totalmente inerte, poderá ocorrer a oxidação do metal (M), observando-se a reação



ou, em casos de anodos de grafite:



- área catódica
- aerada



- não-aerada



Por observação das equações das reações na área catódica observa-se que ocorre formação de hidrogênio e de íons hidroxila, OH^- , daí a razão de se estabelecer, para cada sistema de proteção, a adequada corrente de proteção a fim de se evitar a superproteção. Quando se tem uma moderada superproteção das estruturas de aço não há maiores inconvenientes, sendo as principais desvantagens: gasto de energia elétrica e aumento do consumo de anodos. Porém, em casos extremos, podem ocorrer os seguintes inconvenientes:

- liberação de hidrogênio, na estrutura protegida, em quantidade tal que pode ocasionar fragilização do aço ou empolamento do revestimento;
- excesso de íons OH^- produzido na superfície da estrutura superprotegida ataca metais anfóteros, como alumínio, zinco, chumbo e estanho, acelerando assim a corrosão de estruturas desses metais na área catódica;
- quando se tem instalações pintadas e protegidas catodicamente deve-se indicar tintas que sejam compatíveis com o meio básico, daí se evitar o uso de tintas saponificáveis, como as feitas com óleos naturais, e se preferir aquelas feitas com resinas vinílicas ou epoxi;
- a corrente que flui através do eletrólito, do anodo para a estrutura protegida, produz um potencial no eletrólito. Se existir outra estrutura nas vizinhanças da estrutura protegida ou dos anodos, que não faça parte do sistema de proteção, aquela pode sofrer corrosão: nos pontos em que a corrente entra na estrutura há proteção, entretanto nos pontos em que ela sai há corrosão (corrosão eletrolítica).

24.2.4 Comprovação da proteção

Para comprovação da eficiência da proteção catódica durante a operação da estrutura protegida são indicados alguns ensaios, sendo o mais usado a medição do potencial da estrutura em relação ao meio corrosivo:

- em uma parte da tubulação enterrada retira-se o revestimento, expondo-se então a superfície metálica. Um pedaço de papel de filtro, umedecido com solução de ferricianeto de potássio, $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$, é colocado em contato com essa superfície. Recobre-se com o solo e, após pouco tempo, examina-se o papel: coloração azul indica que a proteção catódica está incompleta, e ausência dessa coloração indica proteção adequada. O resultado desse ensaio é qualitativo, podendo-se concluir da existência ou da ausência de anodos na superfície metálica;

— cupom de teste: pequenos pedaços de aço similar ao da tubulação, cuidadosamente pesados, são conectados ao tubo por meio de um condutor isolado, ficando enterrados ali alguns meses ou mesmo um ano, após o que serão adequadamente limpos e pesados. A perda de massa (se existir) dá uma idéia da eficiência da proteção catódica instalada;

— medição do potencial: verifica-se o potencial da estrutura para o solo usando-se o eletrodo de referência $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$, ou da estrutura para a água do mar usando-se o eletrodo de Ag / AgCl .

As Experiências 24.2, 24.3 e 24.4 permitem comprovar em laboratório os dois métodos de proteção catódica.

Experiência 24.2

Em seis bécheres (A, B, C, D, E e F) de 200 ml adicionar, a cada um, cerca de 150 ml de solução aquosa a 3% de cloreto de sódio.

Acrescentar nos bécheres:

A: um prego de ferro limpo.

B: um prego de ferro ligado (em contato) a uma chapa de cobre.

C: um prego de ferro ligado a uma chapa ou pedaços de zinco.

D: um prego de ferro ligado a fio ou fita de magnésio, isto é, envolver parcialmente um prego com o fio ou a fita de magnésio.

E: um prego de ferro ligado a chapas de cobre e de zinco.

F: um prego de ferro ligado à chapa de cobre e parcialmente envolvido com fio ou fita de magnésio.

Observar que, após algum tempo, cerca de 1-2 horas, nota-se turvação alaranjada mais nítida somente no bécher B, mantendo-se, sem aparente alteração, o aspecto das soluções dos outros bécheres.

Com o decorrer do tempo, após 12-14 horas, já se observa o seguinte nos diferentes bécheres:

A: turvação e possível resíduo com coloração alaranjada.

B: turvação e depósito de resíduo alaranjado, em maior quantidade do que no bécher A.

C, D, E, F: turvação e/ou depósito branco.

Com mais alguns dias de processamento estas características vão-se acentuando e, desde que permaneça o contato metálico entre os diferentes materiais empregados, observa-se que nos bécheres C, D, E e F não se verifica nenhum ataque do prego de ferro, enquanto se acentua o ataque do prego nos bécheres A e B.

Pode-se concluir dessa experiência que o zinco e o magnésio estão protegendo catodicamente o ferro e o ferro ligado a cobre, pois não há aparecimento de resíduo castanho-alaranjado, ferrugem, e sim de resíduo branco, que é de $Zn(OH)_2$ ou $Mg(OH)_2$.

Essa experiência serviu também para mostrar que o ferro é mais rapidamente atacado se estiver ligado a um material metálico que seja catodo em relação a ele, como no caso do par ferro-cobre.

As Experiências 24.3 e 24.4 evidenciam a proteção catódica forçada ou por corrente impressa.

Experiência 24.3

Em um bécher de 400 ml adicionar 250 ml de solução aquosa a 3% de NaCl e 1 ml de solução a 1% de fenolftaleína. Imergir parcialmente dois eletrodos, um de ferro e outro de grafite, imobilizá-los dentro da solução e ligá-los respectivamente aos pólos negativo e positivo de uma fonte de corrente contínua (pode-se usar uma pequena bateria, por exemplo, de 4,5 V). Ou usar um retificador ligado à corrente alternada. Observar que em torno do eletrodo de ferro aparece coloração róseo-avermelhada e também pode-se notar desprendimento de hidrogênio.

Pode-se concluir, portanto, que o ferro está protegido, funcionando como catodo, devido à corrente externa aplicada.

Experiência 24.4

Em um bécher de 400 ml adicionar 250 ml de solução aquosa a 3% de NaCl, 1 ml de solução a 1% de fenolftaleína e 1-2 ml de solução aquosa N de ferricianeto de potássio. Imergir dois eletrodos metálicos, um de ferro e outro de cobre, imobilizá-los dentro da solução e ligá-los por meio de fio de cobre ou outro condutor. Decorridos alguns minutos notar-se-á coloração róseo-avermelhada em torno do eletrodo de cobre e resíduo azul em torno do ferro, indicando portanto que o ferro está sendo corroído.

Imergir, agora, um eletrodo auxiliar de grafite e ligá-lo ao pólo positivo da bateria, ligando também o ferro e o cobre ao pólo negativo. (Se a solução já estiver com muito resíduo azul ou coloração vermelha é mais conveniente, para melhor observação, substituí-la por nova solução.)

Observa-se que em torno do ferro e do cobre aparece a coloração vermelha, indicando portanto que o ferro está agora também funcionando como catodo às expensas da corrente externa e o grafite como anodo.

24.3 ESCOLHA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA

Para a escolha do sistema a ser adotado para a proteção catódica eficiente de uma determinada estrutura metálica devem ser considerados tanto os aspectos técnicos quanto os econômicos, sendo essa escolha função basicamente das características da estrutura metálica a proteger (material, tipo, condições de operação, dimensões, forma geométrica, tipo de revestimento empregado, localização etc.) e do meio onde ela estiver construída (solo, água do mar, água doce etc.).

A experiência do projetista influi decisivamente nessa definição, sendo que para uma orientação geral a Tabela 24.5 é de grande utilidade.

Tabela 24.5 Comparação entre os sistemas galvânicos e por corrente impressa

Sistema galvânico	Sistema por corrente impressa
1) Não requer fonte externa de corrente elétrica.	1) Requer fonte externa de corrente elétrica.
2) Em geral econômico para requisitos de corrente elétrica de até 5 A.	2) Em geral, econômico para requisitos de corrente elétrica acima de 5 A.
3) Manutenção mais simples.	3) Manutenção menos simples.
4) Possui vida limitada.	4) Pode ser projetado para vida bastante longa.
5) Necessita de acompanhamento operacional.	5) Necessita de acompanhamento operacional.
6) Somente para eletrólito de muito baixa resistividade elétrica, em geral de até 3.000 Ω . cm.	6) Pode ser usado em eletrólitos com qualquer valor de resistividade elétrica, inclusive os de muito baixa resistividade.
7) Não apresenta problemas de interferências com estruturas estranhas.	7) Pode apresentar problemas de interferência com estruturas estranhas.
8) Não admite regulagem ou admite regulagem precária.	8) Pode ser regulado com facilidade.

24.4 LEVANTAMENTOS DE CAMPO PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA

Qualquer que seja a estrutura metálica a ser protegida, o projeto de proteção catódica só pode ser elaborado com sucesso após a realização de medições e testes de campo convenientes. A experiência do engenheiro de proteção catódica é fundamental para a realização desse trabalho e para a análise dos resultados dele provenientes.

Os procedimentos mais utilizados nessas condições são os apresentados a seguir

24.4.1 Levantamento de dados a respeito da estrutura a ser protegida

As principais informações necessárias ao planejamento das medições de campo, bem como à elaboração do projeto, são as seguintes:

- a) material da estrutura a ser protegida;
- b) especificações e propriedades do revestimento protetor, se existir;
- c) características de construção, dimensionais e geométricas;
- d) mapas e plantas de localização, desenhos e detalhes de construção;
- e) localização e características de outras estruturas metálicas enterradas ou submersas existentes nas proximidades;
- f) existência ou não de sistemas de proteção catódica instalados nessas estruturas estranhas, incluindo o cadastramento de todas as características e condições de operação de tais sistemas;
- g) levantamento cuidadoso das condições de operação das linhas de transmissão elétrica em alta tensão que sigam em paralelo ou cruzem com tubulações enterradas sob estudo capazes de causar problemas de indução de corrente;
- h) levantamento cuidadoso de todas as fontes de corrente contínua existentes nas proximidades que possam causar qualquer problema de corrosão eletrolítica na estrutura metálica em estudo;
- i) levantamento de todas as linhas de corrente alternada em baixa e média tensão, existentes na região, possíveis de serem utilizadas para a alimentação de retificadores de proteção catódica. Quando na região não existem linhas elétricas de corrente alternada para alimentação de retificadores e quando os anodos galvânicos não podem ser usados devido às características do solo (resistividade elétrica alta), existem outras opções para o sistema de proteção catódica, a saber:
 - utilização de células solares, conjugadas com baterias, especialmente construídas para aplicações em proteção catódica.
 - utilização de geradores termoeletrônicos, alimentados a gás, também projetados para sistemas de proteção catódica.
 - utilização de geradores de corrente alternada, conjugados com retificadores de proteção catódica convencionais.

24.4.2 Medições e testes de campo

De posse das informações constantes do item anterior, o engenheiro de corrosão deve organizar o seu programa de levantamentos de campo que pode utilizar todas ou algumas das medições a seguir descritas, dependendo de cada caso.

a) Medições das resistividades elétricas, com as seguintes finalidades:

- avaliar as condições de corrosão a que estará sujeita a estrutura metálica;
- definir sobre a utilização de sistema galvânico ou por corrente impressa;
- escolher os melhores locais para a instalação dos anodos;
- estudar os problemas de indução de corrente elétrica em tubulações enterradas, causados por linhas de transmissão elétrica em alta-tensão.

b) Medições dos potenciais estrutura/eletrolito, com o auxílio de voltímetros apropriados com alta resistência interna e eletrodos de referência, como os de Cu/CuSO_4 e Ag/AgCl , conforme mostrado esquematicamente na Fig. 24.10.

Essas medições são feitas com as seguintes finalidades:

- avaliar as condições de corrosividade a que está sujeita a estrutura metálica;
- detectar e estudar os problemas de corrosão eletrolítica que possam ocorrer utilizando-se, para esses casos, além do voltímetro convencional um voltímetro registrador, que permite medições prolongadas em cada ponto testado com registros dos potenciais observados;

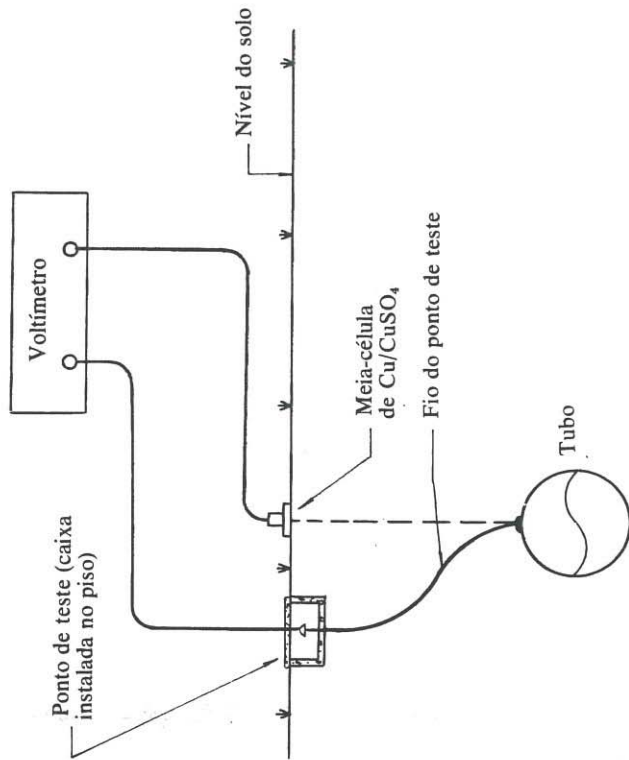


Fig. 24.10 Medição do potencial tubo/solo de uma tubulação enterrada.

- verificar se a estrutura encontra-se protegida após a instalação do sistema de proteção catódica.

c) Escolha dos locais para a instalação dos anodos; essa tarefa é de grande importância para a definição do melhor sistema de proteção catódica a ser instalado e é realizada tendo em vista os seguintes fatores principais:

- locais de baixa resistividade elétrica;
- distribuição de corrente ao longo da estrutura;
- locais de fácil acesso para a montagem e inspeção;
- locais onde haja energia elétrica em corrente alternada, para o caso da instalação de retificadores e anodos inertes.

d) Testes para a determinação da corrente necessária. Esses testes são realizados mediante injeções de corrente na estrutura estudada com o auxílio de uma fonte de corrente contínua (bateria, máquina de solda, retificador) e uma cama de anodos provisória (sucata de aço) Fig. 24.11.

Com as medições das correntes injetadas em determinados trechos e dos potenciais obtidos consegue-se, com relativa facilidade, determinar a densidade de corrente (A/m^2) a ser utilizada no projeto, já considerada a eficiência do revestimento da estrutura.

A corrente elétrica (I) em ampères, dividida pela área da superfície entre os pontos B e C (distantes aproximadamente 100 m entre si), permite calcular o valor da densidade de corrente elétrica (corrente elétrica por unidade de área) para o cálculo da corrente total a ser utilizada na proteção catódica da tubulação. Convém observar que o mesmo tipo de teste pode ser adaptado à determinação da corrente necessária para proteger tanques de armazenamento ou estacas de aço cravadas no mar.

Quando a estrutura a ser protegida não foi ainda instalada, fato muito comum de ocorrer, o valor da densidade de corrente elétrica a ser utilizada pode ser calculado, com boa precisão, conforme descrito em cálculo da corrente elétrica de proteção, 24.6.1.

influenciadas por correntes de interferência, como as provenientes das estradas de ferro eletrificadas, esse critério não pode ser utilizado.

24.6 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA

O cálculo de um sistema de proteção catódica é uma tarefa relativamente simples de ser realizada, bastando que sejam consultadas as fórmulas existentes na literatura especializada e adotados valores corretos para alguns parâmetros importantes, como a resistividade elétrica do eletrólito, a densidade de corrente elétrica e a eficiência do revestimento aplicado.

A concepção do sistema, entretanto, não é tarefa das mais simples, exigindo do projetista domínio perfeito do assunto e boa experiência com instalações similares, uma vez que decisões com a escolha do método mais adequado de proteção, o tipo, posicionamento e detalhe de instalação dos anodos, a definição do número, tipo e distribuição dos retificadores, a necessidade ou não de dispositivos de interligação elétrica, isolamento, drenagem etc., dependerão fundamentalmente desses conhecimentos e dessa experiência. É muito importante que as medições de campo e o projeto de proteção catódica sejam realizados pelo mesmo engenheiro.

Um dos roteiros mais simples para o dimensionamento consiste nas etapas descritas a seguir.

24.6.1 Cálculo da corrente elétrica de proteção

Quando a corrente elétrica necessária para a proteção catódica de uma determinada estrutura não pode ser obtida no campo, por intermédio do teste de corrente mostrado em 24.4.2, ela precisa ser calculada.

A fórmula³ utilizada para esse cálculo é a seguinte:

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

Onde

I = corrente elétrica, em mA.

A = área a ser protegida, em m².

Dc = densidade de corrente elétrica, em mA/m².

F = fator de correção da velocidade.

E = eficiência do revestimento.

Os parâmetros envolvidos na Eq. (1) devem ser calculados ou estimados tendo em vista as orientações seguintes:

a) Para o cálculo da área (A)

• considerar apenas as partes em contato com o eletrólito.

b) Para a densidade de corrente elétrica (Dc)

• considerar a superfície a proteger completamente nua, sem revestimento;

• o valor Dc depende da resistividade do eletrólito, segundo a equação

$$Dc = 73,73 - 13,35 \log \rho \quad (2)$$

Onde

Dc = densidade de corrente elétrica, em mA/m².

ρ = resistividade elétrica do eletrólito, em $\Omega \cdot \text{cm}$.

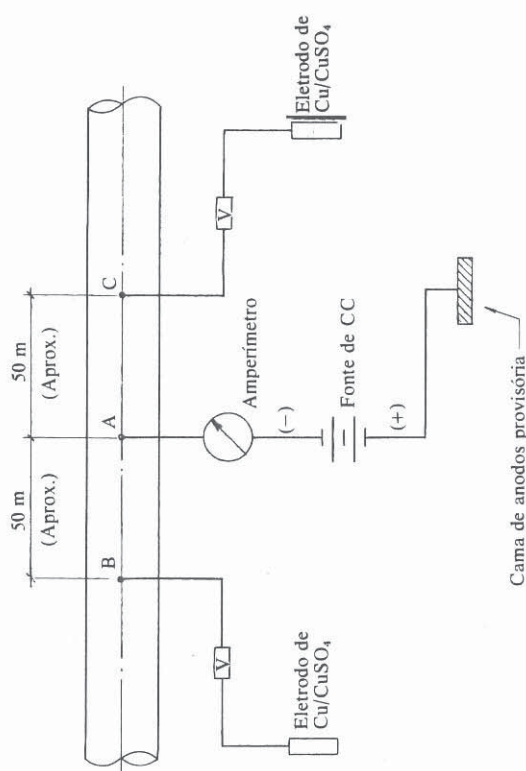


Fig. 24.11 Teste para a determinação da densidade de corrente.

e) Outros testes, medições e observações. Além dos procedimentos já descritos são realizados, ainda, embora com menor frequência, alguns dos testes seguintes, de acordo com as necessidades de cada caso em particular.

- medições do pH do eletrólito;
- pesquisa de corrosão por bactérias;
- coleta de amostras do produto oriundo da corrosão para análise em laboratório.

24.5 CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO CATÓDICA

O critério mais seguro e adotado no mundo inteiro para saber se uma estrutura metálica encontra-se protegida catódicamente consiste nas medições dos potenciais estrutura/eletrólito: tubo/solo, estaca/água, tanque/solo etc.

Essas medições são realizadas conforme mostrado na Fig. 24.10 com o auxílio de um eletrodo de referência e a utilização no campo das meias-células ou eletrodos de Cu/CuSO_4 (para solos) e de Ag/AgCl (para água do mar ou eletrólitos líquidos).

Assim, uma estrutura de aço encontra-se protegida quando, com o funcionamento do sistema de proteção catódica, consegue-se obter qualquer uma das situações seguintes:

- potenciais estrutura/eletrólito mais negativos que $-0,85 \text{ V}$, para medições com a meia-célula de Cu/CuSO_4 ;
- potenciais estrutura/eletrólito mais negativos que $-0,80 \text{ V}$, para medições com a meia-célula de Ag/AgCl ;

c) variação de no mínimo $0,25 \text{ V}$, no campo negativo, para medições tanto com a meia-célula de Cu/CuSO_4 quanto com a de Ag/AgCl . Nesse caso, torna-se necessário que os potenciais sejam medidos antes e depois do sistema de proteção catódica ser ligado, para que a variação obtida no potencial possa ser observada. Para estruturas

Tabela 24.6

Velocidade (m/s)	F
1	1,00
2	1,11
3	1,17
4	1,22
5	1,24
6	1,25
7 e maior	1,27

Como pode ser visto, se a resistividade elétrica do eletrólito (solo, água etc.) não for medida corretamente no campo, a densidade de corrente apresentará um erro que poderá comprometer o sistema de proteção catódica.

c) *Para o fator de correção da velocidade (F)*

- utilizado apenas quando existe movimentação do eletrólito em relação à estrutura;
 - o seu valor pode ser obtido na Tabela 24.6.
- d) *Para a eficiência do revestimento (E)*
- esse parâmetro precisa ser estimado em função da experiência do projetista, sendo extremamente importante para o cálculo correto da corrente elétrica uma vez que pequenas diferenças nessa estimativa acarretam grandes variações na corrente calculada;
 - depende do tipo de revestimento e dos cuidados tomados com sua aplicação, inspeção e reparos;
 - a Tabela 24.7 fornece indicações para a sua estimativa.

Uma vez calculada a corrente de proteção, escolhe-se o tipo de sistema a ser utilizado (galvânico ou corrente impressa), de acordo com as orientações mostradas em escolha do sistema de proteção catódica (24.3).

Tabela 24.7 Eficiências médias de diversos tipos de revestimentos

Tipo de estrutura a proteger	Qualidade do revestimento	Eficiência E (%)
Tubulações enterradas ou submersas	Excelente Bom Regular Ruim	90 a 95 80 a 90 50 a 80 0 a 50
Fundo de tanque (parte externa)	Bom Regular Ruim	60 a 80 40 a 60 0 a 40
Fundo de tanque (parte interna)	Excelente	90 a 95
Embarcações	Excelente Bom Regular Ruim	90 a 95 80 a 90 50 a 80 0 a 50

24.6.2 Por anodos galvânicos ou de sacrifício

24.6.2.1 Cálculo da resistência

O sistema de proteção galvânica funcionará de acordo com a Lei de Ohm, segundo a equação

$$I = \frac{\Delta V}{R_t} \quad (3)$$

Onde:

I = corrente elétrica de proteção, em ampères.

ΔV = diferença de potencial entre o anodo galvânico utilizado e a estrutura a proteger, em volts.

R_t = resistência total do circuito de proteção catódica, em ohm.

Para a aplicação correta da Eq. (3) as seguintes observações são importantes:

a) o valor de I , ou sua soma, deve ser maior ou igual à corrente necessária, calculada de acordo com o visto em cálculo da corrente elétrica de proteção (24.6.1).

b) o valor ΔV significa a diferença entre o potencial natural do anodo, mostrado na Tabela 24.8, e o potencial de proteção do material metálico da estrutura ($-0,80$ V, para o aço, em relação ao eletrodo de Ag/AgCl ou $-0,85$ V para o eletrodo de Cu/CuSO₄).

c) o valor R_t pode ser calculado com o auxílio da equação

$$R_t = R_{ca} + R_c + R_a \quad (4)$$

Onde

R_{ca} = resistência do cabo elétrico de ligação, quando existente, entre o anodo, ou anodos, e a estrutura metálica. Essa resistência depende do comprimento e bitola do cabo, podendo ser obtida através de tabelas dos fabricantes.

R_c = resistência de contato entre a estrutura (catodo) e o eletrólito que a envolve. Para o caso dos sistemas onde os eletrólitos são de baixa resistividade elétrica, o valor de R_c é muito pequeno em relação às outras parcelas, podendo ser desprezado nos cálculos.

R_a = resistência de contato entre o anodo, ou anodos, e o eletrólito. Essa resistência depende basicamente do formato do anodo e da resistividade elétrica do eletrólito, podendo ser calculada por intermédio das fórmulas empíricas que se seguem.

— Cálculo da resistência de um anodo cilíndrico instalado na posição vertical.

$$R_v = \frac{0,0052 \rho}{L} \left(2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 \right) \quad (5)$$

Onde

R_v = resistência de um anodo vertical, em ohm.

ρ = resistividade elétrica do eletrólito, em $\Omega \cdot \text{cm}$.

L = comprimento do anodo, em pés.

d = diâmetro do anodo, em pés.

Obs.: Quando se usa enchimento condutor os valores de "L" e "d" podem ser o comprimento e o diâmetro da coluna de enchimento.

— **Cálculo da resistência de um grupo de anodos verticais, instalados em paralelo.**

$$Ra = \frac{0,0052 \rho}{NL} \left(2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} 2,3 \log 0,656 N \right) \quad (6)$$

Onde

Ra = resistência dos diversos anodos verticais, em ohm.

N = número de anodos.

S = espaçamento entre os anodos, em pés.

— **Cálculo da resistência de um anodo cilíndrico, instalado na posição horizontal.**

$$Rh = \frac{0,0052 \rho}{L} \left[2,3 \log \frac{4L^2 + 4L \sqrt{p^2 + L^2}}{d \cdot p} + \frac{p}{L} - \frac{\sqrt{p^2 + L^2}}{L} - 1 \right] \quad (7)$$

Onde

Rh = resistência do anodo horizontal, em ohm.

p = dobro da profundidade do anodo, em pés.

Obs.: Para a resistência de "N" anodos, dividir o valor de "Rh" por "N".

24.6.2.2 Cálculo da vida dos anodos galvânicos

Para o cálculo do tempo de duração dos anodos galvânicos ou definição da massa total de anodos a ser utilizada para uma determinada vida, a seguinte expressão pode ser utilizada:

$$V = \frac{MC \cdot 0,85}{8760 \cdot I} \quad (8)$$

Onde

V = vida dos anodos, em anos.

M = massa total de anodos, em kg.

C = capacidade de corrente do anodo, em A.h/kg (Tabela 24.8).

I = corrente liberada pelos anodos, em ampère.

0,85 = fator de utilização do anodo (85%).

Tabela 24.8 Principais características dos anodos galvânicos*

Anodo	Capacidade de corrente C (A.h/kg)	Potencial em circuito aberto (Cu/CuSO ₄)	Massa específica (g/cm ³)
Magnésio	1.100	-1,70 V	1,8
Zinco	740	-1,10 V	7,2
Alumínio	1.870-2.500	-1,10 V	2,8

* Anodos de fabricação nacional. Para aplicações práticas recomenda-se consultar o catálogo do fabricante.

24.6.2.3 Distribuição e fixação dos anodos galvânicos

A distribuição e o método de fixação dos anodos galvânicos ao longo da estrutura a proteger são decisões importantes, uma vez que delas dependerão a boa distribuição de corrente, facilidade ou dificuldade de instalação e o maior ou menor custo do sistema. Para essas escolhas não existem regras definidas. O bom senso e a experiência do projetista são fundamentais para a obtenção de bons resultados. Como orientação geral, os anodos podem ser fixados das seguintes maneiras:

- com solda *Cadweld*, para os anodos fornecidos com cabo elétrico. Nesses casos o cabo elétrico utilizado possui isolamento duplo, com uma camada isolante de polietileno e capa protetora externa de composto de cloreto de polivinila. A ligação do cabo elétrico do anodo, construída pelo fabricante do anodo, é normalmente selada com epoxi.
- com solda elétrica, para os anodos fabricados com alma de aço, como por exemplo na proteção catódica galvânica de navios e plataformas de petróleo.
- com o auxílio de parafusos, em locais de difícil substituição dos anodos.
- com o auxílio de rosca no próprio anodo, como nos motores marítimos e alguns equipamentos industriais.

Para a escolha do tipo de anodo a ser utilizado a Tabela 24.3 deve ser consultada.

24.6.3 Por corrente impressa ou forçada

Esse dimensionamento precisa obedecer também à Lei de Ohm, sendo que a Eq. (3) deve ser agora interpretada da seguinte maneira:

I = corrente de proteção, em ampères, para cada conjunto retificador/cama de anodos a ser instalado. O número de retificadores é definido em função da corrente total necessária, das condições de distribuição dessa corrente ao longo da estrutura, da existência de locais de resistividade elétrica adequada e das disponibilidades de circuitos de corrente alternada nesses locais.

ΔV = tensão de saída, em corrente contínua, do retificador. Os retificadores podem ser dimensionados para ampla faixa de saída, tanto de tensão quanto de corrente, sendo mais comuns os seguintes valores:

a) *para instalações terrestres*:

— tensões de 30 V a 100 V.

— correntes de 5 A a 50 A.

b) *para instalações marítimas*:

— tensões de 10 V a 20 V.

— correntes de 50 A a 400 A.

Rt = resistência total do circuito de um conjunto retificador/cama de anodos, podendo ser calculada segundo a mesma orientação mostrada para os anodos galvânicos. A resistência Rt deve ser menor que a resistência nominal do retificador, Rr. Em geral, usa-se $Rr \geq 1,2 Rt$.

24.6.3.1 Cálculo da vida dos anodos inertes

Os anodos utilizados para os sistemas por corrente impressa, embora recebam a denominação genérica de anodos inertes, sofrem certo desgaste com o passar do tempo em função das densidades de corrente aplicadas em suas superfícies. Essas densidades de corrente precisam ser mantidas dentro de determinados limites, conforme mostrado na

Tabela 24.9 Características dos anodos inertes*

Material do anodo	Densidade de corrente recomendada (A/m ²)	Desgaste "D" esperado (kg/A. ano)
Grafite	3 a 5	0,4
Fe-Si	10 a 15	0,2
Fe-Si-Cr	10 a 15	0,4**
Pb-Sb-Ag	50 a 100	0,1

* Anodos de fabricação nacional. Para aplicações práticas recomenda-se consultar o catálogo do fabricante.

**Em água do mar.

Tabela 24.9, e a vida dos anodos, nessas circunstâncias, pode ser calculada através da expressão

$$V = \frac{0,85 M}{D.I.} \quad (9)$$

Onde

V = vida dos anodos, em anos.

M = massa total dos anodos, em kg.

D = desgaste esperado do anodo, em kg/A.ano (Tabela 24.9).

I = corrente injetada pelo retificador, em A.

0,85 = fator de utilização dos anodos.

24.6.3.1.1 Exemplo prático

Calcular a resistência total de aterramento de uma cama de anodos com 20 anodos de grafite (dimensões = 1.500 mm x 75 mm, peso = 12 kg), instalados na posição vertical, com enchimento condutor de coque metalúrgico moído (dimensões = 3.000 mm x 254 mm), espaçados de 6 m. Sabendo-se que a cama de anodos será ligada a um retificador de 50 V, 30 A, destinado a proteger uma adutora, qual será a vida dos anodos de grafite para a operação do retificador em carga máxima? A resistividade elétrica média, medida no local de instalação dos anodos, é de 9.000 Ω.cm.

— A fórmula a ser utilizada é a (6)

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

Onde:

N = 20 anodos.

ρ = 9.000 Ω.cm.

L = 3.000 mm (para o valor de "L" pode-se utilizar o comprimento da coluna de coque).

d = 254 mm (diâmetro da coluna de coque).

S = 6.000 mm.

OBS.: lembrar que os valores de L, d e S precisam ser convertidos em pés, para aplicação na fórmula.

O valor obtido para Ra é 1,45 Ω, aproximadamente.

A vida dos anodos pode ser calculada da seguinte maneira, fórmula (9)

$$V = \frac{0,85 M}{D.I.}$$

Onde

M = 240 kg (massa de 20 anodos).

D = 0,40 kg/A. ano.

I = 30 A.

Logo

V = 17 anos.

Na realidade a vida dos anodos será superior a 17 anos, uma vez que boa parte da corrente será descarregada através do enchimento condutor (coque metalúrgico moído) o que reduzirá sensivelmente o desgaste do anodo.

24.6.3.2 Distribuição e métodos de instalação dos retificadores e anodos inertes

Como nos sistemas galvânicos, essas importantes decisões para o bom desempenho do sistema dependem basicamente da experiência e do bom senso do projetista e não obedecem a regras definidas.

Para a escolha do tipo de anodo a ser utilizado, a Tabela 24.4 fornece orientações importantes.

24.7 INSTRUMENTOS

A utilização de instrumentos adequados para as medições de campo e verificação das condições de funcionamento dos sistemas de proteção catódica é fundamental importância para o sucesso do combate à corrosão nas estruturas metálicas enterradas ou submersas.

Os instrumentos mais indicados e utilizados com frequência nessas tarefas são apresentados a seguir.

24.7.1 Instrumentos para medições de resistividades elétricas de solos

a) VIBROGROUND

Esse instrumento (marca registrada) utiliza o Método de "Wenner" ou "Método dos Quatro Pinos", para medições em profundidades diferentes (normalmente 1,5 m, 3,0 m, 4,5 m e 6,0 m do nível do solo) e fornece leituras com boa precisão, sendo por isso mesmo dos mais utilizados nos trabalhos de proteção catódica. O instrumento, alimentado por pilhas comuns de lanterna, injeta no solo por intermédio de dois pinos uma corrente elétrica alternada, de onda quadrada, na tensão aproximada de 125 V. Com o auxílio de dois outros pinos o aparelho mede a corrente elétrica aplicada e traduz essa queda em resistividade elétrica.

b) MEGGER

Esse instrumento, também de marca registrada, utiliza o mesmo princípio de funcionamento do anterior, utilizando, entretanto, um gerador próprio acionado por manivela,

no lugar das pilhas comuns de lanterna. Embora forneça resultados também corretos para os valores das resistividades, ele é menos utilizado nos serviços de proteção catódica devido à maior facilidade de operação que o Vibroground apresenta.

c) RGE 5000

Desenvolvido recentemente por um fabricante nacional, esse instrumento apresenta as mesmas características do "Vibroground", com a vantagem de utilizar um circuito transistorizado em substituição ao vibrador convencional, que é motivo de defeitos frequentes.

24.7.2 Dispositivos para medições de resistividades elétricas de eletrólitos líquidos

Para essas aplicações, bem como para medições de amostras de solos, o eletrólito a ser testado é colocado em uma caixa padrão, construída de um material isolante, com duas faces opostas metálicas onde são conectados os terminais de um ohmímetro. A resistência elétrica medida pode, então, ser facilmente convertida em resistividade elétrica pela relação existente entre a área de uma das placas metálicas e a separação existente entre elas, de acordo com a equação utilizada para o cálculo da resistência elétrica de um condutor

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (10)$$

Onde

ρ = resistividade elétrica a determinar, em $\Omega \cdot \text{cm}$.

R = resistência medida, em ohm.

S = área de uma das placas metálicas, em cm^2 .

L = separação existente entre as duas placas metálicas, em cm.

24.7.3 Voltímetros

Os voltímetros são os instrumentos mais utilizados nas aplicações de proteção catódica para as medições, principalmente dos potenciais estrutura/eletrólito. A escolha desses aparelhos deve ser criteriosa, pois se o voltímetro adequado não for utilizado os valores observados poderão apresentar erros grosseiros, que comprometerão a análise das condições levantadas. Os voltímetros mais indicados são os seguintes:

a) **VOLTÍMETROS COM ALTA RESISTÊNCIA INTERNA**

Os voltímetros usados para as medições em proteção catódica precisam ser robustos e oferecer boa precisão, uma vez que os valores de tensão com que se trabalha são baixos, e mesmo pequenas porcentagens de erro nas leituras podem conduzir a enganos significativos nos resultados finais.

Além disso, os voltímetros precisam ter alta resistência interna (ou alta sensibilidade), para leituras corretas mesmo em circuitos com alta resistência externa, como acontece, por exemplo, nas medições dos potenciais em relação ao eletrodo de Cu/CuSO_4 , de uma tubulação enterrada em solo com resistividade elétrica de média para alta. O valor mínimo exigido para a resistência interna de um voltímetro, nessas condições, é de $50.000 \Omega/V$.

b) **VOLTÍMETROS POTENCIOMÉTRICOS**

Para medições onde a resistividade elétrica do solo é muito alta recomenda-se utilizar um voltímetro potenciométrico com alta resistência interna. Os voltímetros potenciométricos, por intermédio de uma fonte própria de energia (pilhas comuns), equilibram o valor do potencial da estrutura com uma tensão fornecida pelas pilhas, proporcionando valores corretos e que independem do circuito externo de medição.

c) **VOLTÍMETROS REGISTRADORES**

Indispensáveis para o estudo de sistemas influenciados por correntes de fuga, esses instrumentos registram continuamente os potenciais estrutura/eletrólito em um gráfico apropriado, permitindo uma análise criteriosa das condições de corrosão ou proteção da estrutura durante grandes períodos de tempo, sendo comuns observações de 24 horas para cada ponto testado.

24.7.4 Amperímetros

São utilizados para as medições da corrente elétrica de saída de um retificador, da corrente elétrica de uma cama de anodos galvânicos, da corrente elétrica que circula em um dispositivo de drenagem etc., sendo por isso mesmo muito úteis nas aplicações de proteção catódica. Normalmente, os próprios voltímetros anteriormente descritos são utilizados também como amperímetros.

24.7.5 Volt — Ohm — Miliamperímetros

São instrumentos muito utilizados, principalmente para a manutenção de retificadores, uma vez que permitem medições também em circuitos de corrente alternada. Combinam, em um só instrumento, determinações dos valores de potenciais, pequenas correntes e resistências elétricas.

24.7.6 Eletrodos de referência

Também chamados de meias-células ou semicélulas, os eletrodos de referência, em conjunto com os voltímetros, são os acessórios mais importantes para os trabalhos de proteção catódica, uma vez que permitem o fechamento do circuito estrutura/voltímetro/eletrólito/estrutura, necessário para a realização das leituras.

Os dois tipos mais utilizados para as medições de campo são os seguintes:

a) semicélula de Cu/CuSO_4 , utilizada para medições em solos.

b) semicélula de Ag/AgCl , utilizada para medições na água do mar.

24.8 APLICAÇÕES

24.8.1 Proteção catódica de tubulações enterradas

As tubulações enterradas, tais como oleodutos, gasodutos, minerodutos, adutoras, redes de incêndio etc., constituem-se na aplicação mais comum dos sistemas de proteção catódica.

Para esses casos podem ser instalados tanto os sistemas galvânicos quanto os sistemas por corrente impressa, sendo esses últimos os mais utilizados uma vez que na maioria das vezes as tubulações são de médio a grande porte, lançadas em solos de resistividade elétrica superior a 3.000 $\Omega \cdot \text{cm}$ e em regiões com disponibilidade de corrente alternada para alimentação de retificadores. Quando a tubulação a ser protegida encontra-se influenciada por estradas de ferro eletrificadas os anodos galvânicos não devem ser utilizados.

Para a proteção catódica galvânica de tubulações enterradas é comum adotar-se a seguinte orientação:

- utilização de anodos de magnésio ensacados em enchimento de gesso, bentonita e sulfato de sódio. Os anodos de zinco raramente são utilizados e os de alumínio não servem para esse tipo de aplicação.
- os anodos são normalmente instalados em camas ou leitos (Fig. 24.12). Em alguns casos são ligados individualmente à tubulação (Fig. 24.8.A).
- instalação de caixas de teste em cada cama de anodos para medições das correntes drenadas, dos potenciais tubo/solo e do potencial do anodo em circuito aberto.
- instalação de pontos de teste ao longo da linha para as medições periódicas dos potenciais tubo/solo.
- instalação de juntas de isolamento elétrico nas extremidades da tubulação, se necessário.

Para a proteção com sistema por corrente impressa deve-se adotar a orientação:

- utilização de anodos de grafite, ferro-silício ou ferro-silício-cromo, de acordo com a Tabela 24.4.
- os anodos são sempre instalados em camas ou leitos (Fig. 24.9.A), ligados ao positivo do retificador e normalmente envoltos com enchimento de coque metalúrgico moído.
- os retificadores são instalados em locais criteriosamente escolhidos, em função das condições de distribuição de corrente, das disponibilidades de corrente alternada e da existência de locais adequados para a instalação das camas de anodos.
- instalação de pontos de teste ao longo da linha, para as medições periódicas dos potenciais tubo/solo.
- instalação de juntas de isolamento elétrico nas extremidades da tubulação, se necessário.
- instalação de caixas de interligação elétrica com tubulações estranhas, se necessário.
- instalação de dispositivo(s) de drenagem das correntes tubo/trilho, se a tubulação estiver influenciada por correntes de interferência oriundas de estradas de ferro eletrificadas.

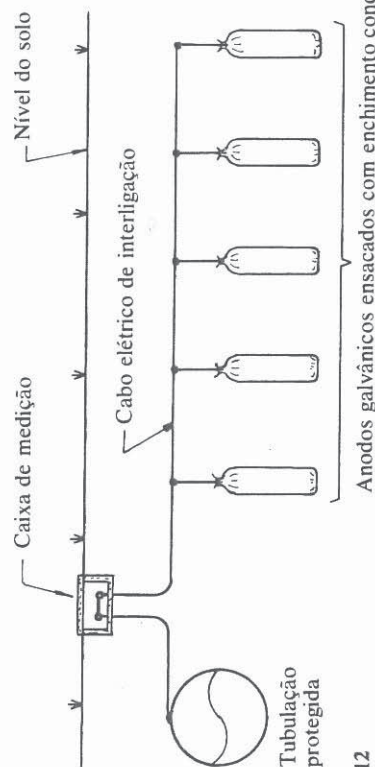


Fig. 24.12

24.8.1.1 Exemplo prático

Um gasoduto destinado ao transporte de gás natural possui as características seguintes:

- comprimento total: 140 km.
- diâmetro nominal: 10 polegadas.
- material: aço API-5LX-46.
- revestimento externo: "Coal-tar" (alcatrão de hulha), véu de fibra de vidro e papel feltro.

O dimensionamento do sistema de proteção catódica do gasoduto foi realizado segundo o roteiro seguinte:

a) MEDIÇÕES DAS RESISTIVIDADES ELÉTRICAS DO SOLO

Foram medidos um total de 50 pontos ao longo do gasoduto, com espaçamento aproximado de 2,8 km entre medições. Em cada ponto foram feitas 4 medições, correspondentes às profundidades de 1,5 m, 3,0 m, 4,5 m e 6,0 m do nível do solo, pelo método dos quatro pinos e com o auxílio do instrumento "Vibroground".

A resistividade elétrica média encontrada foi de aproximadamente 120.000 $\Omega \cdot \text{cm}$, com valores variando desde 1.000 $\Omega \cdot \text{cm}$ até 900.000 $\Omega \cdot \text{cm}$.

b) CÁLCULO DA CORRENTE ELÉTRICA NECESSÁRIA PARA A PROTEÇÃO CATÓDICA (fórmula 1)

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

$$A = 111.658 \text{ m}^2 \text{ (aprox.)}$$

$$\rho = 120.000 \Omega \cdot \text{cm}$$

$$Dc = 73,73 - 13,35 \log \rho = 6 \text{ m A/m}^2 \text{ (aprox.)} \quad (\text{fórmula 2}) \quad (2)$$

$$F = 1 \text{ (Tabela 24.6)}$$

$$E = 0,9 \text{ (90\%)} \text{ (Tabela 24.7)}$$

$$I = 67 \text{ A (aprox.)}$$

c) ESCOLHA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA A SER INSTALADO

Tendo em vista os valores da resistividade elétrica do solo e da corrente elétrica necessária, decidiu-se instalar um sistema de proteção catódica por corrente impressa.

d) ESCOLHA DO NÚMERO E CAPACIDADE DOS RETIFICADORES

- corrente elétrica necessária: 67 A (aprox.)
- folga para a operação dos retificadores com 75% de carga: 22 A (aprox.)
- corrente elétrica total necessária de ser instalada: 89 A
- número e capacidade dos retificadores instalados: três retificadores iguais, cada um com a capacidade nominal de 30 A.

e) DISTRIBUIÇÃO E COMPONENTES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA INSTALADO

Após criterioso levantamento para a escolha dos melhores pontos para a instalação de retificadores e camas de anodos (locais com baixa resistividade elétrica, de fácil acesso, com disponibilidade de corrente elétrica alternada e bem distribuídas ao longo da tubulação), decidiu-se projetar e instalar o sistema de proteção catódica com os seguintes equipamentos e acessórios:

- I — um conjunto retificador/cama de anodos, próximo ao km 0 + 500, com as seguintes características:
 - retificador: refrigerado a ar natural, à prova de tempo, diodos de silício, com capacidade para 50 V, 30 A, alimentado com circuito elétrico de CA local em 220 V, 60 Hz.
 - cama de anodos: 13 anodos de Fe-Si (1.500 mm/50 mm), espaçados de 3,0 m, para uma vida total superior a 20 anos.

- II — um conjunto retificador/cama de anodos, nas proximidades do km 57, com as seguintes características:
- retificador: mesmas características do anterior.
 - cama de anodos: 14 anodos de Fe-Si (1.500 mm/50 mm), espaçados de 6,0 m, para uma vida superior a 20 anos.
- III — um conjunto retificador/cama de anodos, nas proximidades do km 100, com as seguintes características:
- retificador: mesmas características dos anteriores.
 - cama de anodos: 18 anodos de Fe-Si (1.500 mm/50 mm), espaçados de 4,5 m, para uma vida superior a 20 anos.
- IV — duas juntas de isolamento elétrico, uma em cada extremidade do gasoduto, destinadas a impedir que parte da corrente elétrica de proteção catódica seja captada pelas estações existentes.
- V — 45 pontos de teste, com espaçamento aproximado de 3 km, destinados às medições periódicas dos potenciais tubo/solo.
- f) **OPERAÇÃO DO SISTEMA**
- Após instalado, o sistema de proteção catódica foi colocado em operação, fornecendo potenciais de proteção ao longo de todo o gasoduto, uma vez que todos os pontos testados adquiriram potenciais tubo/solo mais negativos que $-0,85$ V (medições realizadas com um voltímetro 50.000 Ω/V e uma meia-célula de $Cu/CuSO_4$).

24.8.2 Proteção catódica de tubulações submersas

Para a proteção de tais estruturas, como oleodutos e gasodutos lançados no mar, emissários submarinos de esgotos etc., também os sistemas por corrente impressa são os preferidos, embora os anodos galvânicos também sejam utilizados em função das características de cada obra em particular.

Nos sistemas galvânicos são, de um modo geral, adotadas as seguintes medidas:

- utilização de anodos de zinco ou de alumínio. O uso de anodos de magnésio só é cogitado se a tubulação for lançada em água doce.
 - os anodos galvânicos são normalmente fixados diretamente aos tubos, por intermédio de solda elétrica da alma de aço do anodo.
- Para os sistemas por corrente impressa a melhor orientação é no sentido de:*
- utilização de anodos de Fe-Si-Cr, com ou sem enchimento condutor, para as tubulações submersas no mar ou utilização de anodos de grafite ou Fe-Si, para o caso de água doce.
 - os anodos podem ser lançados diretamente no fundo do mar ou enterrados na praia, dependendo de cada situação em particular.

24.8.3 Proteção catódica de píeres de atracação de navios

As estacas de aço cravadas no mar, para a sustentação dos píeres de atracação de navios, são normalmente protegidas com o auxílio dos sistemas por corrente impressa (Fig. 24.9B). Para o caso de pequenos píeres ou quando não se dispõe de alimentação elétrica no local, lança-se mão de anodos galvânicos.

A proteção catódica nessas estruturas atua tanto nas partes cravadas no solo quanto nas partes submersas, sendo que as partes aéreas das estacas (acima do nível da água até o concreto) só podem ser protegidas com o auxílio de um revestimento adequado.

Para a proteção catódica galvânica dessas obras é comum adotar-se a seguinte orientação:

- uso de anodos de zinco ou de alumínio, fixados diretamente às estacas ou suspensos por intermédio de suportes apropriados.
 - interligações elétricas entre as estacas por intermédio de vergalhões de aço embutidos no concreto, se houver necessidade.
- No caso dos sistemas por corrente impressa os procedimentos mais adotados são:*
- utilização de anodos de chumbo-antimônio-prata, para o caso das construções em estacas tubulares, onde os anodos são instalados suspensos.
 - utilização de anodos de ferro-silício-cromo, para o caso das estacas-prancha, quando os anodos, de um modo geral, são instalados no fundo do mar.
 - utilização de retificadores quase sempre imersos em óleo, devido às condições agressivas da atmosfera marinha.
 - utilização de retificadores à prova de explosão, para o caso de píeres que operam com produtos inflamáveis.
 - necessidade de interligar eletricamente as estacas, o que é feito, na maioria das vezes, por intermédio de vergalhões de aço embutidos no concreto.

24.8.4 Proteção catódica de tanques de armazenamento

Os tanques de armazenamento de petróleo, de derivados de petróleo, produtos químicos e água sofrem, na maioria das vezes, corrosão severa e constituem-se, também, em aplicações importantes dos sistemas de proteção catódica.

Para a proteção interna das partes em contato com eletrólito, como os selos de água salgada existentes nos tanques que armazenam petróleo, a proteção com anodos galvânicos de zinco ou alumínio é a mais recomendada, sendo os anodos fixados diretamente na chapa do fundo, com distribuição uniforme ao longo de toda a área a proteger.

No caso da proteção externa do fundo do tanque, normalmente em contato com o solo ou com uma base de concreto, o sistema por corrente impressa é o mais utilizado, sendo que para o caso de pequenos tanques isolados e construídos sobre solos de baixa resistividade elétrica os sistemas galvânicos são os preferidos.

Os anodos a ser utilizados, tanto para os sistemas galvânicos quanto para os sistemas por corrente impressa, obedecem às mesmas orientações mostradas para a proteção de tubulações enterradas. Quanto à distribuição, os anodos podem ser instalados em camas próximas ou afastadas, sendo comum a instalação de anodos circundando os tanques.

Um dos cuidados a ser tomado na proteção externa dos tanques de armazenamento diz respeito aos sistemas de aterramento elétrico dos mesmos, quando existentes. Esses aterramentos elétricos, desnecessários na grande maioria dos casos, são construídos com cabos e hastes de cobre e, além de agravar a corrosão do fundo do tanque (devido ao par galvânico formado aço/cobre) dificultam extremamente a obtenção dos potenciais de proteção. Existem, na literatura técnica especializada, vários trabalhos que mostram ser desnecessário aterrar tanques de aço construídos sobre o solo ou sobre uma base de concreto.⁴ Para os casos em que o aterramento é julgado imprescindível pelo projetista ou usuário dos tanques, recomenda-se a utilização de anodos de zinco e cabos de cobre revestidos para a sua execução.

24.8.4.1 Exemplo prático

Um parque de tanques de terminal de graneis líquidos possui os seguintes tanques cilíndricos com bases apoiadas em fundação de concreto:

- 6 tanques com diâmetro de 17,0 m.
- 12 tanques com diâmetro de 13,0 m.
- 12 tanques com diâmetro de 9,5 m.

Todos os tanques possuem, entre a chapa do fundo e a base de concreto, uma camada de asfalto de petróleo.

O sistema de proteção catódica para a proteção das partes externas das chapas dos fundos dos tanques foi dimensionado de acordo com o roteiro que se segue.

a) MEDIÇÕES DAS RESISTIVIDADES ELÉTRICAS DO SOLO

Foram medidos um total de 15 pontos, distribuídos nos diques dos tanques. Em cada ponto foram feitas 4 medições, nas profundidades de 1,5 m, 3,0 m, 4,5 m e 6,0 m do nível do solo pelo Método dos Quatro Pinos, com o auxílio do instrumento "Vibroground". Os valores encontrados variaram entre 800 $\Omega \cdot \text{cm}$ e 1.400 $\Omega \cdot \text{cm}$, com um valor médio de 1.000 $\Omega \cdot \text{cm}$.

b) POTENCIAIS TANQUE/SOLO

O potencial de cada tanque em relação ao solo foi medido com o auxílio de um voltímetro especial (50.000 Ω/V) e uma meia-célula de Cu/CuSO_4 . Os valores encontrados foram de ordem de $-0,5 \text{ V}$.

c) CÁLCULO DA CORRENTE ELÉTRICA NECESSÁRIA PARA A PROTEÇÃO CATÓDICA

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

$$A = 3.803 \text{ m}^2 (\text{aprox.}).$$

$$\rho = 1.000 \Omega \cdot \text{cm}.$$

$$Dc = 73,73 - 13,35 \log \rho = 33,7 \text{ m A/m}^2 (\text{aprox.}).$$

$$F = 1.$$

$$E = 0,4 (40\%).$$

$$I = 77 \text{ A (aprox.}).$$

d) ESCOLHA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA A SER INSTALADO

Considerando a intensidade de corrente elétrica necessária, decidiu-se projetar um sistema de proteção catódica por corrente impressa.

e) ESCOLHA DO NÚMERO E CAPACIDADE DOS RETIFICADORES

— corrente elétrica necessária: 77 A.

— folga para operação dos retificadores com 75% de carga: 25 A.

— corrente elétrica total a ser instalada: 102 A.

Decidiu-se projetar apenas um retificador, com capacidade nominal para 100 A.

f) DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA

Retificador: um retificador à prova de explosão, refrigerado a óleo, diodos de silício, com capacidade para 25 V, 100 A, alimentado com circuito elétrico trifásico, 480 V, 60 Hz, existente no Terminal.

Anodos: 67 anodos de ferro-silício (1.000 mm \times 50 mm), distribuídos ao longo do parque de tanques em camas circundando cada tanque. A vida dos anodos será superior a 50 anos.

Observação: O número de anodos foi definido em função da necessidade de uma boa distribuição de corrente elétrica em todos os tanques, fazendo com que sua vida seja bem superior ao mínimo exigido (20 anos).

g) INTERLIGAÇÕES ELÉTRICAS

Os tanques são interligados eletricamente pelas próprias tubulações existentes no Terminal.

24.8.5 Proteção catódica de navios e embarcações

Outra vasta aplicação dos sistemas de proteção catódica consiste nos cascos dos navios e embarcações de um modo geral, bem como as partes internas dos tanques de lastro de navios que transportam petróleo. Para a proteção interna dos tanques de lastro os sistemas galvânicos são sempre utilizados mediante a instalação de anodos de zinco ou

de alumínio, uma vez que os anodos de magnésio não são permitidos pelas Sociedades Classificadoras para essas aplicações.

Para a proteção externa do casco são utilizados tanto os sistemas galvânicos, para embarcações e navios de pequeno e médio porte, quanto os sistemas por corrente impressa, para os navios de médio e grande porte. No caso dos sistemas galvânicos podem ser utilizados tanto os anodos de zinco quanto os de alumínio, devido à sua capacidade de corrente mais elevada e menor peso em comparação ao zinco.

A tinta utilizada para o casco do navio ou embarcação deve ser do tipo não-saponificável, o menos porosa possível e com razoável resistência à abrasão.

Os anodos são fornecidos com a face interna pintada, com o objetivo de distribuir melhor a corrente elétrica de proteção ao longo do casco do navio.

Os anodos galvânicos de zinco devem ser fabricados com composição química bem controlada, não sendo admitidos teores acima de determinados valores para alguns componentes importantes, como o chumbo, o ferro, o cobre e o silício.

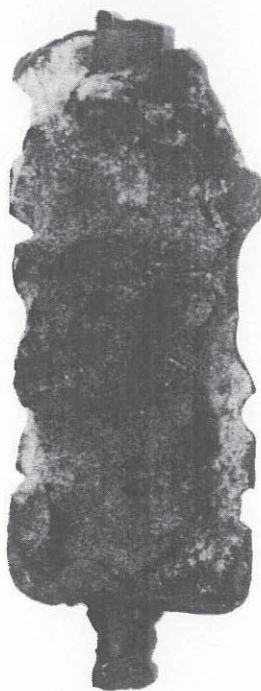


Fig. 24.13 Anodo de zinco retirado de casco de embarcação.

Para o dimensionamento de um sistema galvânico de proteção catódica para o casco de um navio ou embarcação devem ser adotadas as mesmas orientações mostradas em dimensionamento de sistema de proteção catódica (24.6), sendo que para o cálculo da "área molhada" a ser protegida a seguinte expressão pode ser utilizada:

$$W = (1,7 \cdot L \cdot d) + \frac{V}{d} \quad (11)$$

Onde

W = área molhada do casco e acessórios, em pés quadrados.

L = comprimento do navio entre perpendiculares, em pés.

d = calado médio em pleno deslocamento, em pés.

V = deslocamento volumétrico moldado, em pés cúbicos (aproximadamente 35 pés cúbicos por tonelada de deslocamento, para a água do mar).

Para os navios de médio e grande porte os sistemas por corrente impressa são mais utilizados que os galvânicos devido principalmente ao pequeno peso dos anodos e por serem mais econômicos, uma vez que são projetados para vida longa, não havendo necessidade de substituir os anodos durante as docagens.

Um sistema típico para proteção por corrente impressa do casco de um navio (Fig. 24.14) compreenderá, resumidamente:

a) um ou mais transformadores/retificadores (T/R), alimentados pelo próprio circuito elétrico do navio, capazes de se regular automaticamente por intermédio dos circuitos C (controlador) e AM (amplificador magnético).

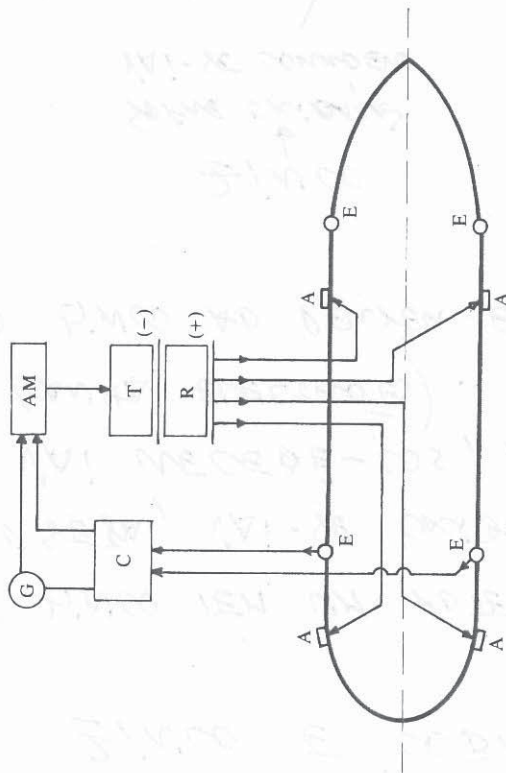


Fig. 24.14

- b) anodos especiais (A), de titânio platinizado ou de chumbo-antimônio-prata, montados no casco e protegidos por blindagens especiais (para evitar danos à pintura).
- c) eletrodos de referência (E), normalmente de zinco, segundo a Especificação MIL-A-18001-H, com o objetivo de controlar automaticamente os potenciais do casco e, em consequência, a corrente fornecida pelo retificador.
- d) um dispositivo de ligação da hélice ao casco, por intermédio de escovas especiais.
- e) Os sistemas de corrente impressa, para essas aplicações, são adquiridos em kits padronizados pelos fabricantes em função das características do navio.

24.8.5.1 Exemplo prático

Proteger com anodos de zinco, tamanho padrão de $(6 \times 12 \times 1 \frac{1}{4})$, peso unitário 10,67 kg, tipo ZHS (Z = zinco, H = casco, S = alças embutidas de aço), uma embarcação de casco de aço, de deslocamento a plena carga de 7.084 toneladas, comprimento entre perpendiculares de 426 pés, calado médio moldado de 12,2 pés.

— Cálculo da área molhada:

Aplicando-se a Expressão (11), tem-se:

$$L = 426 \text{ pés.}$$

$$d = 12,2 \text{ pés.}$$

$$V = 35 \times 7.084 \text{ pés cúbicos.}$$

$$W = 29.158 \text{ pés quadrados (aprox. } 2.730 \text{ m}^2\text{)}.$$

— Cálculo do número de anodos: a quantidade de anodos necessária para proteção completa das obras vivas de um navio é função da "área molhada" total e da densidade de corrente exigida.

Para o cálculo do número de anodos, pode-se usar a seguinte fórmula prática:

$$N = A \frac{W}{1.000 \cdot I} \quad (12)$$

N = número de anodos.

A = densidade de corrente, em miliampêres por pé quadrado.

W = área molhada, em pés quadrados.

I = corrente de saída do tipo de anodo, em A.

Para um ciclo de docagens de 2 anos (ou seja, para uma vida do anodo de 2 anos), pode-se prever 5 miliampêres por pé quadrado de área da popa do navio (ou seja, cerca de 20% do casco) e 2 miliampêres por pé quadrado de área restante (ou seja, cerca de 80% do casco), o que significará uma média de 2,6 miliampêres por pé quadrado de área molhada.

A fórmula (12) se reduzirá a

$$N = 2,6 \frac{W}{1.000 \cdot I} \quad (13)$$

A corrente de saída do anodo ZHS tabelada, função única de sua geometria, é de 0,4 A. (Recomenda-se consultar o catálogo do fabricante para o valor da corrente de saída de cada anodo.) Assim, a fórmula (13) reduz-se a

$$N = 6,5 \frac{W}{1.000} \quad (14)$$

ou seja, um total de 190 anodos, distribuídos simetricamente pelos 2 bordos.

OBS.: A localização dos anodos, ditada pela prática, obedece normalmente a desenhos-padrão. É conveniente ressaltar que os anodos deverão ser fixados por solda de suas alças de fixação (de aço).

As alças e as áreas do casco queimadas pela solda deverão ser cuidadosamente tratadas e pintadas de modo idêntico ao casco. De modo algum deve-se pintar a superfície de zinco do anodo.

24.8.6 Aplicações dos sistemas de proteção catódica no Brasil

Para ilustrar a importância da proteção catódica na operação segura das instalações metálicas enterradas e submersas, são citadas suas principais aplicações no Brasil.

OLEODUTOS — Todos os oleodutos existentes em operação no Brasil são protegidos catódicamente, a maioria deles com sistema por corrente impressa.

GASODUTOS — Assim como os oleodutos, também todos os gasodutos existentes no Brasil possuem sistema de proteção catódica, incluindo as redes de distribuição de gás domiciliar e industrial do Rio de Janeiro e de São Paulo. O sistema por corrente impressa também é o mais utilizado nesses gasodutos.

MINERODUTOS — O Brasil possui atualmente dois minerodutos importantes, um destinado ao transporte de minério de ferro e o outro para transportar rocha fosfática. Todos os dois são protegidos catódicamente, com o auxílio do sistema por corrente impressa.

ADUTORAS — A grande maioria das adutoras de aço das Companhias de Saneamento de todo o Brasil está também protegida catódicamente com sistema por corrente impressa. Como principais exemplos pode-se citar os sistemas de água das cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Vitória, Salvador, Recife, Fortaleza e outras.

EMISSÁRIOS SUBMARINOS — Os emissários submarinos de esgotos das cidades de Santos (SP) e Fortaleza (CE), construídos em aço, estão também protegidos com sistema de proteção catódica por corrente impressa.

PLATAFORMAS DE PETRÓLEO — Todas as plataformas de prospecção e produção de petróleo no mar, atualmente em operação no Brasil, são protegidas catódicamente.