

MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAL DE MÁQUINAS - APMA

CINTIA PINHEIRO COSTA

APLICAÇÃO DA PROTEÇÃO CATÓDICA NA MARINHA MERCANTE

RIO DE JANEIRO

2016

CINTIA PINHEIRO COSTA

APLICAÇÃO DA PROTEÇÃO CATÓDICA NA MARINHA MERCANTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha como parte dos requisitos para obtenção de Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Orientador: Ricardo de Lima Barreto.

RIO DE JANEIRO

2016

CINTIA PINHEIRO COSTA

APLICAÇÃO DA PROTEÇÃO CATÓDICA NA MARINHA MERCANTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha como parte dos requisitos para obtenção de Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: Ricardo de Lima Barreto.

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

Dedico, primeiramente, ao meu Deus misericordioso, e em segundo lugar a minha família que me apoiou a todo instante e sem a qual seria impossível tornar mais este sonho em realidade.

AGRADECIMENTO

A Deus pelo dom da vida e pela oportunidade que me proporcionou de chegar até aqui, além de coragem e força para ultrapassar barreiras e enfrentar obstáculos.

A todos os meus parentes, em especial aos meus pais, pois foram eles que me ensinaram o verdadeiro sentido da vida e me mostraram quão importante é o amor. Agradeço também pela possibilidade de estudo que eles me proporcionaram e, por estarem sempre me incentivando e apoiando em todos os momentos de dificuldades e dúvidas, me dando forças para conseguir seguir em frente.

Ao corpo docente do CIAGA, em especial aos professores Barreto e Raquel Apolaro, que fizeram todo o possível para me orientar neste trabalho e fazer com que o mesmo acontecesse.

A empresa para a qual trabalho Maersk Supply Service, pois me apoiou e me liberou nesses 3 meses para que eu pudesse me dedicar única e exclusivamente a este curso.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando
nos mantemos fiéis a nós mesmos”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

A importância do problema da corrosão constitui a principal causa de deterioração metálica e, por conseguinte, muitas perdas econômicas, em vista disso, deu-se início aos estudos do sistema de proteção catódica. Sabendo-se que o sistema de proteção catódica é uma ciência relativamente nova e, que vem se desenvolvendo numa proporção cada vez maior, este trabalho tem por objetivo principal mostrar os princípios básicos de funcionamento e manutenção deste sistema, bem como algumas de suas aplicações na indústria naval, controlando os custos. Para tal, começaremos dando uma breve explicação sobre como ocorre à corrosão, identificando as suas principais formas, tipos, os custos para os empresários e, de forma a solucionar tal problema, aborda-se-á o sistema de proteção catódica, seus tipos, funcionamento, métodos de inspeção e manutenção, finalizando com algumas aplicações práticas voltadas ao âmbito da marinha mercante.

Palavras-chave: Corrosão. Reação. Proteção catódica. Anodo de sacrifício. Corrente impressa. Marinha Mercante.

ABSTRACT

The importance of the corrosion problem is the main cause of destruction of metal and therefore, a lot of economic losses, in view of this, was initiated the studies about the cathodic protection system. Knowing that the cathodic protection system is a relatively new science, and that has been developing in an every time bigger proportion, this work has the main objective to show the basics principles of operation and maintenance of this system, as well as some of its applications in the naval industry, controlling the costs. For such, we will begin giving a short explanation on as it occurs the corrosion, identifying its main forms, types, the costs for the business and, in order to solve such a problem, it will be presented the system of cathodic protection, its types, operation, methods of inspection and maintenance, finishing with some practical applications related to the extent of the merchant navy.

Keywords: Corrosion. Reaction. Cathodic protection. Sacrificial anode. Impressed current. Marine Merchant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo dos metais	12
Figura 2: Corrosão do tipo uniforme	15
Figura 3: Corrosão por placas	16
Figura 4: Corrosão do tipo Alveolar	16
Figura 5: Corrosão puntiforme ou por pite	17
Figura 6: Casco do navio enferrujado pelo contato com a água	18
Figura 7: Esquema de cuba eletrolítica	19
Figura 8: Corrosão por fadiga por cavitação	20
Figura 9: Corrosão sob tensão no aço inoxidável	20
Figura 10: Corrosão galvânica em metais	21
Figura 11: Corrosão em ligas de cobre/zinco	22
Figura 12: Corrosão gráfitica em componente de bomba centrífuga de ferro fundido	22
Figura 13: Biocorrosão em duto	23
Figura 14: Corrosão em aço inoxidável em torno de corrosão de solda	24
Figura 15: Corrosão localizada causada pelo solo	24
Figura 16: Corrosão em estrutura de concreto armado	25
Figura 17: Gráfico de custo x benefício	30
Figura 18: esquema de um anodo de sacrifício	34
Figura 19: Proteção catódica por corrente galvânica	35
Figura 20: Proteção catódica por corrente impressa	36
Figura 21: Medição do potencial, em relação ao solo, de qualquer material metálico (potencial estrutura/solo)	38
Figura 22: Medição do potencial de proteção catódica (Esquerdo desprotegido – Direito protegido)	38
Figura 23: Placas de zinco colocadas diretamente em contato com o casco	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	CORROSÃO	12
2.1	Conceitos	12
2.2	Corrosão química	13
2.3	Corrosão eletroquímica	13
2.4	Como ocorre a corrosão	14
2.5	Formas de corrosão	15
2.5.1	Corrosão uniforme	15
2.5.2	Corrosão por placas	16
2.5.3	Corrosão alveolar	16
2.5.4	Corrosão por pite	17
2.6	Tipos de corrosão	17
2.6.1	Corrosão pela água	18
2.6.2	Corrosão eletrolítica	18
2.6.3	Corrosão por fadiga	19
2.6.4	Corrosão por tensão	20
2.6.5	Corrosão galvânica	21
2.6.6	Corrosão seletiva	21
2.6.7	Corrosão bacteriológica	22
2.6.8	Corrosão em frestas	23
2.6.9	Corrosão pelo solo	24
2.6.10	Corrosão em concreto	25
2.7	Fatores que influenciam a corrosão	26
2.8	Corrosão em navios	27
2.9	Como prevenir e controlar a corrosão	27
2.10	Custos	29
2.11	Métodos que melhoram a resistência à corrosão	30
3	PROTEÇÃO CATÓDICA	32
3.1	Conceitos	33
3.2	Princípios básicos	33
3.3	Tipos de proteção	34
3.3.1	Proteção catódica galvânica	34

3.3.2	Proteção catódica por corrente impressa	36
3.4	Medição do potencial	37
3.5	Inspeção e manutenção	39
3.6	Custos de um sistema de proteção catódica	40
4	APLICAÇÕES PRÁTICAS NA MARINHA MERCANTE	42
4.1	Proteção catódica em embarcações	42
4.1.1	Proteção do casco	44
4.1.2	Proteção dos tanques de lastro	45
4.1.3	Trocadores de calor	46
4.2	Instalações portuárias	47
4.3	Plataformas marítimas	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

Com o início da utilização de metais extraídos da natureza pelo homem, a preocupação por como se originava a corrosão começou a ser questionada, devido a deteriorização causada nesses metais. Considerando que milhares de tipos de aços foram desenvolvidos, para atender inúmeras finalidades, a preocupação com o combate a corrosão desse período em diante, tem sido constante, contudo, ainda insuficiente para reverter a sua ação destruidora.

Entender o processo de corrosão é uma das alternativas para a adoção de uma ou mais técnicas para a proteção desses metais e ligas. Por isso, é importante atentar para seus tipos, formas e levar em conta também aspectos técnicos e econômicos, visando melhorar o controle, prevenção e custos acessíveis.

Apesar de desenvolvidas várias técnicas e métodos para solucionar tal problema o método em estudo será o sistema de proteção catódica, que dependendo do campo de aplicação elimina por completo o processo de corrosão. Sendo um dos sistemas mais importantes e, conseqüentemente, mais usados para eliminar a corrosão, devido a possibilidade de tornar a estrutura a que se quer proteger imune ao seu ataque.

Visando operações seguras, dentro de níveis econômicos, busca-se um melhor entendimento sobre a proteção catódica que tem um vasto campo de aplicação, tais como: tubulações enterradas, tubulações submersas, instalações portuárias e embarcações marítimas construídas com aço, sendo as aplicações referentes a marinha mercante o objeto deste trabalho.

2 CORROSÃO

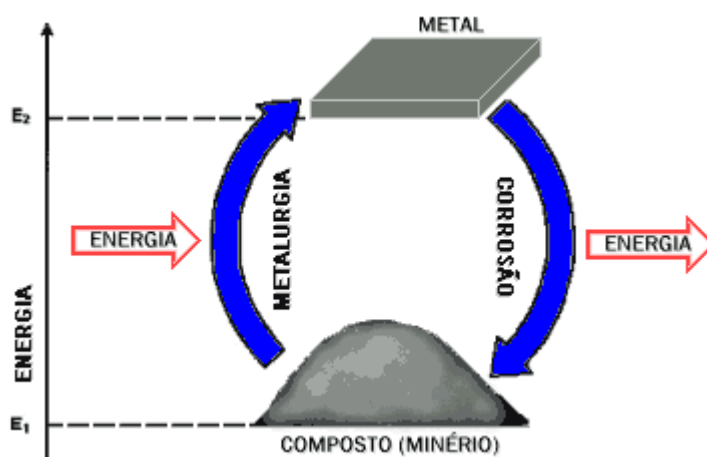
2.1 Conceitos

O termo corrosão já foi usado para descrever um determinado tipo de deteriorização dos metais, excluindo dessa forma materiais não-metálicos. Entretanto, essa definição deixou de ser aplicada, visto que, em alguns compostos não metálicos, tal como o concreto, ocorrem problemas que seguem mecanismos similares aos que ocorrem na corrosão metálica. E assim, esse conceito também passou a ser aplicado a outros tipo de materiais, passando a ser conceituado como a deteriorização dos materiais pela ação do meio.

Dessa forma, corrosão é a deteriorização de materiais, pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associada a uma ação física. Dentre os fenômenos mais importantes, resultantes dessa associação encontram-se a corrosão sob fadiga e sob tensão flutuante. E portanto, quando empregamos qualquer tipo de materiais na indústria, em geral, é necessário que estes resistam à ação do meio corrosivo.

Em geral, nos processos de corrosão, os materiais reagem com elementos não-metálicos presentes no meio, particularmente oxigênio e enxofre, produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos. Conclui-se, portanto, que a corrosão é o inverso dos processos metalúrgicos, o que é ilustrado na figura abaixo.

Figura 1: Ciclo dos metais



Fonte: http://www.iope.com.br/3i_corrosao.php.

Como ilustrado na figura acima, para se obter um metal, cede-se energia ao composto (minério) por intermédio de processos metalúrgicos. Disso resulta que o nível de energia do metal assim obtido será mais elevado que o do composto de onde se originou. Assim, o metal se encontra em equilíbrio metaestável, e em condições propícias, ocorrerão as reações de corrosão, que devolverão ao metal à sua forma original de composto, liberando energia.

Visto isso, e tomando por base o tema proposto para o referido trabalho daremos ênfase a corrosão dos materiais metálicos. E para este tipo de material, os processos corrosivos podem ser classificados em dois grupos que abrangem todos os casos de deterioração por corrosão: corrosão química e corrosão eletroquímica.

2.2 Corrosão química

Na corrosão química não é necessário água no seu estado líquido para que ocorra e, portanto, é também denominada como corrosão em meio não aquoso ou corrosão seca. O campo abrangido pela corrosão química é bem mais restrito que o da corrosão eletrolítica, e surgiu basicamente com a industrialização, compõe-se principalmente pela oxidação, destacando-se a corrosão em alta temperatura. Porém, a corrosão química também ocorre à temperatura ambiente, em meio gasoso e, ainda, em alguns meios líquidos.

O mecanismo da corrosão química é caracterizado por uma reação química do metal com o agente corrosivo, sem que haja deslocamento dos elétrons envolvidos em direção a outras áreas. Como produto de corrosão tem-se a formação de uma película na superfície do meio, cujas condições em que se processa a reação, pode apresentar diferentes propriedades. Tal película, em determinados casos, poderá ter propriedades protetoras e chegar a bloquear, por completo, as reações subsequentes no meio considerado.

2.3 Corrosão eletroquímica

A corrosão eletroquímica é mais frequente na natureza e acontece em sua grande maioria com a presença de água ou de produtos que a contenham, tal como o petróleo, e em temperatura ambiente com formação de uma pilha ou célula de

corrosão. Em face da necessidade do eletrólito conter água líquida, a corrosão eletroquímica é também conhecida como corrosão em meio aquoso.

No mecanismo eletroquímico a reação de corrosão é composta de duas reações parciais: uma reação anódica e outra reação catódica, que se processam em diferentes pontos. A reação anódica é uma reação de oxidação, na qual são liberados elétrons, os quais se deslocam para outros pontos do metal, onde ocorre a reação catódica, que é uma reação de redução. A reação anódica tem como consequência a dissolução do metal, portanto a corrosão, ao passo que a reação catódica conduz à redução de espécies presentes no meio, sem a participação do metal sobre o qual ela tem lugar.

Em decorrência dessas reações os metais reagem com os elementos não metálicos presentes no meio, O_2 , S, CO_2 , produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza. Assim, conclui-se que nestes casos a corrosão corresponde ao processo inverso dos processos metalúrgicos.

2.4 Como ocorre a corrosão

Como já mencionado anteriormente, os metais raramente se encontram em seu estado puro, eles quase sempre são encontrados na natureza em combinação com um ou mais elementos não metálicos presentes no ambiente.

Em se tratando do processo de composição do metal, raras são as exceções, onde não são necessárias quantidades significativas de energia fornecidas aos minérios para reduzi-los aos metais puros. A fundição e conformação posterior do metal envolvem processos onde muita energia é gasta. Entretanto, lembrando do conceito de corrosão já apresentado, como sendo a tendência espontânea do metal a voltar ao seu estado original, muita energia será liberada para que tal processo ocorra.

De uma perspectiva puramente termodinâmica, a tendência de decréscimo de energia é a principal força encorajadora para que ocorra a corrosão metálica.

A corrosão afeta a sociedade de várias maneiras, sendo elas: utilização de maiores coeficientes de segurança, necessidade de manutenção preventiva e corretiva, utilização de materiais mais “nobres” e caros, parada temporária da utilização do equipamento ou da estrutura, contaminação de produto, perda de eficiência, perda de credibilidade, etc.

Obviamente todos estes itens envolvem aspectos econômicos. Devido a isso, houve a necessidade de realizar estudos e pesquisas dos diferentes comportamentos, características, formações, para então, aparecerem métodos eficazes de combate a corrosão.

Em decorrência desses estudos e pesquisas verificou-se que a corrosão pode ocorrer através de várias formas, e sua classificação pode ser feita através da aparência do metal corroído. As formas mais comuns de corrosão que acometem o aço carbono são a corrosão uniforme, a corrosão por placas, a corrosão alveolar e a corrosão por pites, menos comum, porém não menos importante. O que será melhor explicado a seguir.

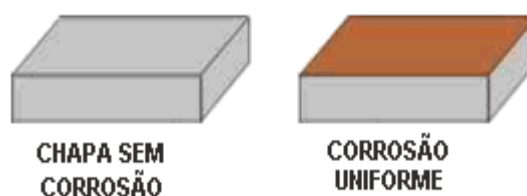
2.5 Formas de corrosão

As formas mais comuns segundo as quais a corrosão pode manifestar-se, são definidas principalmente pela aparência da superfície corroída, sendo as principais:

2.5.1 Corrosão uniforme

É a forma mais comum de ataque corrosivo, acontece de forma aproximadamente uniforme sobre a superfície metálica. É comum em metais que não formam películas protetoras como resultado do ataque, e pode ser observado em grandes regiões da superfície, podendo assim, se distribuir de forma uniforme, e até ser possível estimar sua velocidade.

Figura 2: Corrosão do tipo uniforme

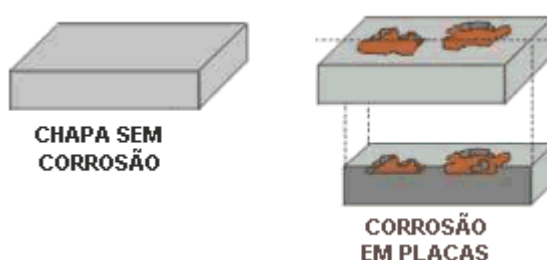


Fonte: http://www.iope.com.br/3i_corrosao_2.php.

2.5.2 Corrosão por placas

Ocorre quando os produtos da corrosão formam-se em placas, estas se desprendem progressivamente em regiões da superfície metálica e não em toda a sua extensão, formando placas com escavações. É comum em metais que formam películas inicialmente protetoras, mas que, ao se tornarem espessas, fraturam e perdem aderência, expondo o metal a novo ataque.

Figura 3: Corrosão por placas

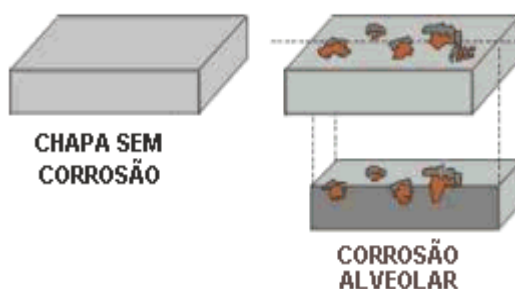


Fonte: http://www.iope.com.br/3i_corrosao_2.php.

2.5.3 Corrosão alveolar

Ocorre quando o desgaste provocado pela corrosão se dá de forma localizada, tendo como aspecto pequenas crateras. É frequente em metais formadores de películas semi-protetoras, ou quando se tem corrosão sob depósito, como no caso da corrosão por aeração diferencial.

Figura 4: Corrosão do tipo alveolar

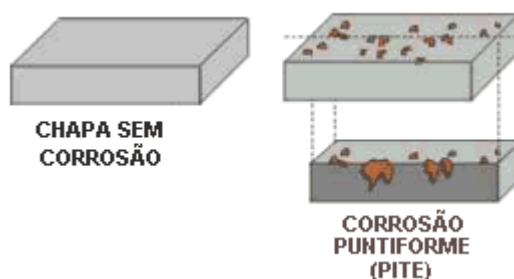


Fonte: http://www.iope.com.br/3i_corrosao_2.php.

2.5.4 Corrosão por pite

Ocorre quando desgaste se dá de forma muito localizada e de alta intensidade, geralmente com profundidade maior que o diâmetro e bordos angulosos, formando verdadeiras perfurações. A corrosão por pites é frequente em metais formadores de películas protetoras, em geral passivas, que, sob a ação de certos agentes agressivos, são destruídas em pontos localizados, os quais se tornam ativos, possibilitando corrosão muito intensa.

Figura 5: Corrosão puntiforme ou por pite



Fonte: http://www.iope.com.br/3i_corrosao_2.php.

2.6 Tipos de corrosão

Temos uma infinidade de tipos de corrosão, e estas recebem designações diferentes, de acordo com as condições particulares em que se processam, com a natureza do meio corrosivo, com o tipo de metais e até mesmo com o aspecto da corrosão.

Porém, por motivo da abrangência desse trabalho ser sobre proteção catódica em embarcações mercantes, iremos apenas tratar dos tipos de corrosões que podem ser evitadas e até eliminadas com o uso de proteção catódica.

Os tipos de corrosões enumerados abaixo são algumas das principais designações dos processos corrosivos de natureza eletroquímica associados aos seus respectivos meios de controle. Sendo assim, importante observar que essas corrosões podem ser combatidas através de outros métodos, mas iremos nos deter apenas ao uso do sistema de proteção catódica.

2.6.1 Corrosão pela água

Denomina-se corrosão pela água os processos corrosivos que se dão em estruturas em contato com meios aquosos, tais como: estacas de píer, tubulações submersas, embarcações, instalações de água de refrigeração, instalações de geração de vapor e distribuição de água. Nas estruturas submersas em água doce, as taxas de corrosão dependerão da quantidade de sais, ácidos ou base dissolvidos, enquanto, em estruturas submersas em água salgada estão sempre sujeitas a grandes taxas de corrosão, que poderão ainda ser aumentadas pela presença de poluentes. Outros fatores influenciam na corrosividade das águas são:

- a) velocidade e temperatura: as taxas de corrosão, de modo geral, crescem com o aumento da velocidade da água e com o aumento da temperatura;
- b) presença de bactérias: as bactérias de certas famílias, em determinadas condições, podem desencadear processo de corrosão ou acelerar os já iniciados;
- c) grau de aeração: quanto maior o teor de oxigênio, maiores as taxas de corrosão.

Figura 6: Casco do navio enferrujado pelo contato com a água



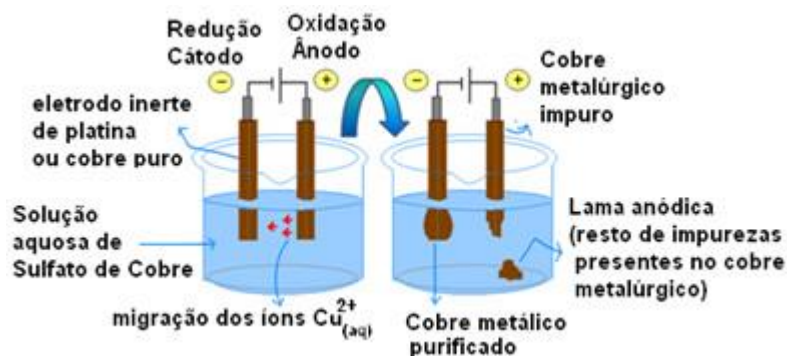
Fonte: <http://brasilecola.uol.com.br/quimica/protecao-contra-corrosao-ferro.htm>.

2.6.2 Corrosão eletrolítica

Denomina-se corrosão eletrolítica aos processos corrosivos de natureza eletroquímica, ocasionados em estruturas metálicas e, podendo ser estas enterradas ou submersas, como resultado de um fluxo indesejável de corrente contínua dispersa no eletrólito. As instalações mais sujeitas a este tipo de ataque são os oleodutos, adutoras, cabos elétricos e cabos de comunicações enterrados. O assunto será melhor abordado nos capítulos a seguir.

Vale lembrar que dependendo da intensidade da corrosão, será necessário o uso de outros métodos complementares.

Figura 7: Esquema de cuba eletrolítica



Fonte: <http://brasilecola.uol.com.br/quimica/eletrolise-com-eletrodos-ativos.htm>.

2.6.3 Corrosão por fadiga

A corrosão por fadiga (ou fadiga sob corrosão) é um processo de corrosão associado à fadiga, onde esta é a deteriorização mecânica dos materiais sujeitos a esforços cíclicos. Quando o fenômeno se processa na presença de um eletrólito ou outro meio corrosivo a sua ação é intensificada.

Neste processo um material diminui a sua resistência à fadiga por várias particularidades, sendo as mais comuns:

- o meio (vácuo, ar, água salgada) em que se encontrará um dado material, o que será determinante para o limite de fadiga aplicado;
- o tempo ou números de ciclos em que o material ficará exposto, sob determinada tensão para surgir a ruptura.

O fenômeno se processa por meio de trincas que se propagam na direção perpendicular aos esforços e, geralmente, se inicia na superfície onde há falhas capazes de concentrar tensões. A corrosão por pites pode ser uma das causas.

Normalmente acontecem em: cabos de aço de submarinos; eixos de hélice de barcos; timões; caldeiras; tubos de evaporadoras; componentes de turbinas; motores e bombas; e tubulações transportadoras de líquidos corrosivos.

Figura 8: Corrosão por fadiga por cavitação



Fonte: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/4227-mecanismo-de-corrosao-por-cavitacao/>.

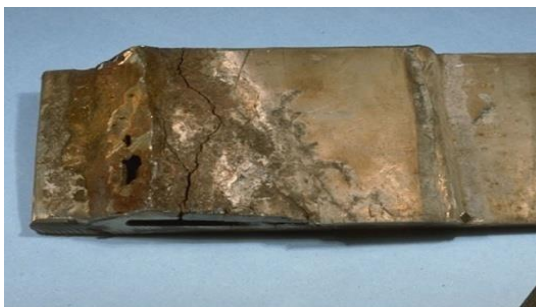
2.6.4 Corrosão sob tensão

Denomina-se corrosão sob tensão o processo de deteriorização de materiais metálicos submetidos a tensões estáticas de tração. Este processo corrosivo progride da superfície para o interior do material, perpendicularmente à direção das tensões, podendo provocar a fratura da peça. A falha do material se manifesta por meio de trincas, geralmente sem qualquer evidência de corrosão superficial, estas trincas vão aumentando e se propagando até romper, são de três tipos: intergranular, transgranular ou ramificada.

Os principais fatores que influenciam na corrosão sob tensão são:

- a) nível das tensões, aplicadas ou internas do material;
- b) suscetibilidade do material ao fenômeno;
- c) meio corrosivo;
- d) tempo.

Figura 9: Corrosão sob tensão no aço inoxidável



Fonte: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/4171-corrosao-sob-tensao-no-aco-inoxidavel/>.

2.6.5 Corrosão galvânica

Denomina-se corrosão galvânica o processo corrosivo resultante do contato mútuo entre materiais ou duas ligas distintas, em presença de um eletrólito, formando uma pilha passiva/ativa, na qual o material menos nobre (ânodo) é corroído. Este tipo de corrosão será tão mais intenso quanto maior for a distância entre os materiais, na tabela de potenciais eletroquímicos, no eletrólito considerado. Terá também grande influência a relação entre as áreas anódica e catódica. Esta relação deverá ser a maior possível, a fim de que o desgaste seja menor e mais uniforme na área anódica.

Figura 10: Corrosão galvânica em metais



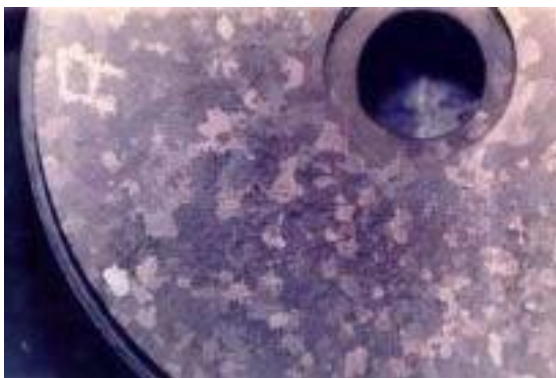
Fonte: https://www.google.com.br/search?q=corros%C3%A3o&biw=1280&bih=699&source=lms&tbn=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwiJmdDW8s3MAhXFFpAKHeNTA4gQ_AUIBigB#tbn=isch&q=corros%C3%A3o+galv%C3%A2nica&imgsrc=eXoRci9m5aqjxM%3A.

2.6.6 Corrosão seletiva

É usada para designar algumas formas de corrosão preferencial, nas quais apenas um dos elementos de uma liga metálica será corroído. O resultado de tal fenômeno é uma estrutura esponjosa sem nenhuma resistência mecânica. Alguns exemplos de corrosão seletiva são:

- a) dezincificação: ocorre em latões com mais de 20% de Zn em contato com água salgada e com ácidos nos quais o zinco é atacado;

Figura 11: Corrosão em ligas de cobre/zinco



Fonte: <http://107.21.65.169/content/ABAAAASVEAE/formas-corrosao-com-imagens-detalhadas>.

b) bráfítica: ocorre em ferros fundidos cinzentos em contato com meios ácidos e em água salgada. O ferro é atacado e o material fica reduzido a uma estrutura composta de carbono e carbonetos.

Figura 12: Corrosão gráfítica em componente de bomba centrífuga de ferro fundido



Fonte: <http://107.21.65.169/content/ABAAAASVEAE/formas-corrosao-com-imagens-Detalhadas>.

2.6.7 Corrosão bacteriológica

Também conhecida por biocorrosão, corrosão bacteriana ou microbiológica é um processo eletroquímico onde podem ser desencadeados ou acelerados por certos tipos de bactérias, em determinadas condições. A ocorrência deste tipo de corrosão não é rara em tubulações enterradas, principalmente em terrenos de alta umidade, inclusive pantanosos.

A ação da bactéria se dá através da modificação do meio, tornando-se agressivo ou intensificando sua agressividade, podendo assim atacar materiais metálicos de várias maneiras entre as quais:

- Produzindo ácidos minerais (H_2SO_4 , H_2S , etc.) ou ácidos orgânicos (acético e fórmico)

Figura 13: Biocorrosão em duto



Fonte: http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-11642014000100003.

2.6.8 Corrosão em frestas

A corrosão em frestas é uma forma localizada de corrosão que ocorre quando pequenas quantidades de um meio corrosível ficam retidas em frestas com aberturas inferiores a 3mm, o ataque maior será quanto menor for a abertura da fresta e maior for sua profundidade, em cavidades ou quaisquer espaços confinados, ou seja, onde o fluxo de corrosível é muito difícil ou nulo, e o suprimento de oxigênio fica diminuído, nesse tipo de corrosão os materiais estão sujeitos à corrosão por aeração diferencial e por concentração iônica diferencial. As frestas ocorrem normalmente em juntas soldadas com chapas sobrepostas, em juntas rebitadas em ligações flangeadas, em ligações rosqueadas, em chapas aparafusadas, dentre outras.

No interior da fresta, ocorrem reações eletrolíticas que modificam a composição do eletrólito, tornando-o mais ácido. A diminuição do pH permite a ruptura da camada passivadora dos aços inoxidáveis, resultando em intensa corrosão localizada.

Figura 14: Corrosão em aço inoxidável em torno de corrosão de solda



Fonte: <http://107.21.65.169/content/ABAAAASVEAE/formas-corrosao-com-imagens-detalhadas>.

2.6.9 Corrosão pelo solo

Designam-se corrosão pelo solo os processos corrosivos observados em estruturas enterradas. Estas estruturas são, normalmente, tubulações, estações metálicas, cabos de transmissão e de telecomunicações, tanques enterrados e outros.

A corrosão provocada pelo solo, em uma planta industrial, dependerá de muitas variáveis, sendo estas: aeração, umidade, pH, presença de microorganismos, condições climáticas, heterogeneidades, presença de bactérias e fertilizantes, presença de despejos industriais, melhor ou pior qualidade de revestimento, contato bimetalico devido a malha de aterramento elétrico de cobre e fuga de gás. Essa grande quantidade de variáveis faz com que o solo seja um dos meios corrosivos mais complexos que existem, sendo praticamente impossível de se determinar com exatidão sua ação agressiva para metais metálicos nele enterrados.

Figura 15: Corrosão localizada causada pelo solo



Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/361704/>.

2.6.10 Corrosão em concretos

A corrosão em concreto abrange, principalmente, os processos corrosivos que incidem na ferragem de reforço do concreto armado em alguns casos de deterioração da própria argamassa de cimento. Esta ferrugem está sujeita à corrosão, tanto em estruturas aéreas quanto nas submersas e enterradas. O ataque ocorre devido à infiltração de umidade que alcança o metal, o que é muito facilitado no caso de pequenas espessuras de recobrimento da armadura do concreto, já em caso de concreto com baixa porosidade e alta espessura de recobrimento da armadura, a umidade não chegará a construir problema, devido a pequena capacidade de infiltração, e porque a basicidade do concreto pode neutralizar a sua ação agressiva. As atmosferas sulfurosas podem atacar os cimentos ricos em aluminato tricálcio ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) e além de deteriorar o concreto, acabam por expor a ferragem ao meio, intensificando o processo de degradação da estrutura.

O emprego da proteção catódica em estruturas de concreto enterradas ou submersas ainda não é muito frequente no Brasil, devido a dificuldades, tais como: a necessidade de interligar toda armadura de concreto, de modo a funcionar como negativo único e as possibilidades de fraturas no concreto, devido aos esforços gerados pela pressão parcial do hidrogênio liberado no catodo, quando submetido a potenciais muito negativos.

Figura 16: Corrosão em estrutura de concreto armado



Fonte: www.ecivilnet.com/artigos/corrosao_de_armaduras.htm.

2.7 Fatores que influenciam a corrosão

Existem vários fatores que influenciam na corrosão, abaixo discutiremos os principais fatores. Sendo importante lembrar, que como a corrosão é um processo que se dá na superfície do material, este fenômeno é influenciado pelas características do meio corrosivo ao seu redor. No caso de equipamentos de processo, a maior parte das vezes, o meio corrosivo é o próprio fluido de trabalho.

As características do fluido que influenciam no processo de corrosão, quanto à natureza, são:

- a) temperatura: Em geral, só o aumento da temperatura já é uma forma de agravar a corrosão, porém para temperaturas acima da temperatura de orvalho, as formas de corrosão eletroquímica não ocorrerão. Porém, quando os equipamentos são parados a temperatura decresce e pode ficar menor que a temperatura de orvalho causando intensa corrosão nestes momentos.
- b) concentração: Em geral a corrosão será mais severa para altas concentrações de fluidos, contudo para fluidos ácidos pode haver violenta corrosão dos materiais mesmo para pequenas concentrações.
- c) impureza: A presença de impurezas no fluido pode atenuar ou agravar a corrosão, sendo mais frequente o agravamento. A presença do oxigênio é benéfica se o metal puder ser passivado pela formação de óxidos, caso contrário o oxigênio agrava a corrosão. A presença de gases dissolvidos em suspensão no fluido em geral agrava a contaminação.
- d) umidade: Para que a corrosão eletroquímica ocorra é necessária a presença de umidade, assim, a umidade também é considerada como um agravante para tal processo. Lembrando que, a umidade pode reagir com gases poluentes da atmosfera gerando ácidos.
- e) velocidade: Para baixa velocidade do fluido e sem a presença de turbilhonamento, aparecerá na parede do material a camada de aderência, a qual serve de proteção contra a corrosão, contudo se a velocidade for muito baixa ou nula poderá ocorrer a chamada corrosão por frestas. Para velocidade acima de um certo valor, ocorrendo ou não o turbilhonamento, essa arrancará as crostas e escamas formados na superfície do material, agravando a corrosão.

De forma geral quando o material metálico for sujeito a corrosão sob tensão ela será agravada caso a frequência cíclica das tensões for aumentada ou se a própria tensão de tração for elevada.

Outro fator que influencia no processo de corrosão é o acabamento das peças metálicas, principalmente quando se fala no processo de corrosão por pites, sendo assim, quanto melhor for o acabamento menor será a corrosão.

As regiões de interface com gases, líquido-gás, por exemplo, sempre serão mais sujeitas ao processo de corrosão, pois nessas regiões haverá a dissolução dos gases que modificarão a natureza do líquido, e também haverá diferença de potencial causada pela parte seca e molhada da peça.

2.8 Corrosão em navios

A destruição causada pelo processo corrosivo é responsável por grandes prejuízos, tanto pela necessidade de substituição de chapas de aço, quanto pelo aumento da rugosidade das superfícies do casco, como também pelo aumento no consumo de combustível, utilizado para o deslocamento do navio ou embarcação. Sendo assim, a corrosão do casco, tanques, equipamentos, entre outros, contribuem para a necessidade de reparos periódicos e trabalhosos, bem como para redução considerável da segurança operacional, causando um lucro cessante, na ordem de milhões ao dia.

Quando se trata de corrosão naval, vários aspectos devem ser levados em consideração, tais como: a região climática em que os navios operam, tipos de cargas a transportar, tipos de construção, natureza das águas, águas nos portos e qualidade da manutenção das embarcações.

2.9 Como prevenir e controlar a corrosão

Os métodos gerais para controle e prevenção de corrosão mais amplamente aceitos na indústria são: o uso de materiais de construção especiais resistentes a corrosão, a aplicação de barreiras inertes como a pintura industrial, a utilização de métodos de proteção catódica ou anódica, bem como os ajustes no meio eletrolítico ou corrosivos da química, a aplicação de inibidores específicos para controle de corrosão, além da aplicação de sistemas anti-corrosivos.

A forma mais eficiente para prevenir a corrosão é tentar controlar o processo de oxidação e evitar ataque de fatores externos, uma forma encontrada é criar uma camada protetora anti-corrosiva chamada proteção de barreira. A maioria dos produtos que geram estas barreiras protetoras são feitos à base de cera, teflon ou silicone. Alguns são selantes, ou seja, impedem a penetração do ar e da umidade, porém, os mesmos não são capazes de expulsar o sal e a umidade previamente depositados sobre a camada a ser protegida, visto que, esses são as principais causa da corrosão e oxidação.

Embora mais lenta, como não se cessa o processo de corrosão entre a camada selante e o metal base, estes continuam reagindo através de eletrólise. Esta corrosão fica visível, pois há o aparecimento de bolhas nas superfícies selantes ou nos revestimentos metálicos.

Outra forma para evitar o aparecimento da corrosão é evitar cavidades ou frestas, pois estas podem acumular água e umidade. Qualquer região em que duas superfícies estão muito próximas pode ser considerada uma fresta. Deve neste caso ser analisado: parafusos, rebites, cantoneiras perfiladas, soldas irregulares, respingos de solda, cantos vivos, descontinuidades e soldas intermitentes.

As tintas de fundo aplicadas com pincel ou spray servem para proteger e assim evitar o aparecimento da corrosão, ela forma uma barreira adicional, e por isso, é importante que quando aplicada a tinta selecionada tenha correlação com a atividade do meio corrosivo.

Ainda com o intuito de prevenir o processo de corrosão, é válido impedir o acesso da água nas áreas em que ela possa ficar retida por longos períodos, preenchendo frestas e cavidades com produtos selantes.

De modo a evitar a corrosão galvânica, o melhor é intercalar, entre dois metais ou ligas, um isolante elétrico. É importante atentar, que o material isolante não poderá ser poroso, pois desta forma, ele poderá absorver água e causar a corrosão por frestas.

A maneira mais eficaz e barata de evitar a corrosão é projetar corretamente a obra, tendo em mente um projeto baseado em ações anti-corrosivas. Uma construção econômica é aquela que apresenta os menores custos ao longo de sua vida.

Algumas providências a serem tomadas para o controle de corrosão já na fase de projeto são:

- a) sempre preferir materiais mais resistentes a corrosão;
- b) empregar revestimentos protetores;
- c) quando possível realizar a proteção catódica;
- d) evitar cavidades onde o fluido possa ficar retido;
- e) dar preferência a trajetória aerodinâmica de regime laminar para os fluidos;
- f) evitar pontos de concentração de tensões, causados na maioria das vezes por descontinuidades geométricas, soldas descontínuas ou por cargas concentradas;
- g) evitar o contato ou soldagem de materiais ou ligas metálicas diferentes;
- h) projetar dispositivos de inspeção para vasos, tanques ou outros reservatório;
- i) evitar juntas, gaxetas e outras peças que possam reter fluidos corrosivos.

Caso o controle de corrosão não seja econômico deve-se estimar uma margem de corrosão, que consistirá no cálculo de uma espessura extra da peça metálica, a qual poderá ser sacrificada sem prejudicar a resistência mecânica da peça.

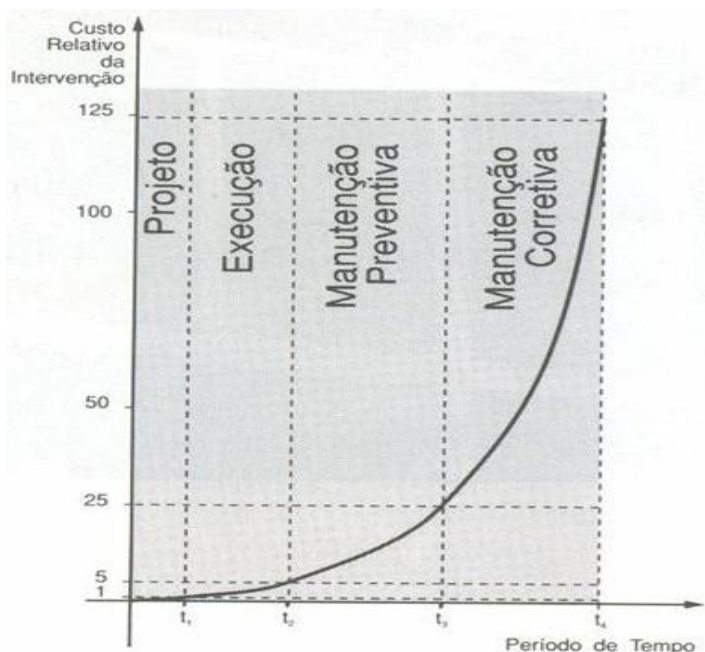
2.10 Custos

Para realizar uma análise de custos, deve-se considerar a lei de Sitter ou lei dos cinco (a cada etapa os custos são multiplicados por cinco), onde se interpreta a evolução progressiva de custos de manutenção. Seguindo este gráfico fica claro, que quando a manutenção é racionalizada desde os projetos os custos são menores, porém quando a manutenção ocorre somente na fase de uso, os custos são maiores (t_3 e t_4).

É importante frisar, que os custos com manutenções preventivas são menores que os das corretivas. Eis aqui um dos pontos de viabilidade no investimento na manutenção.

Abaixo segue o gráfico comparativo de custo x benefício.

Figura 17: Gráfico de custo x benefício



Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/355376/>.

t_1 - danos ligeiros, não perceptíveis -> manutenção preditiva-> R\$ 1,00

t_2 - danos leves -> manutenção preventiva-> R\$ 5,00

t_3 - danos moderados -> manutenção corretiva-> R\$ 25,00

t_4 - danos graves -> restauro-> R\$ 125,00

2.11 Métodos que melhoram a resistência à corrosão

Alguns materiais de elevado uso industrial possuem baixa resistência a corrosão na maioria dos meios. Utilizando técnicas ou métodos de proteção anti-corrosiva é possível que essa resistência seja melhorada, ampliada ou até mesmo obtida em seu mais elevado grau. Dentre estas técnicas ou métodos podem ser citados os revestimentos, os inibidores de corrosão, as técnicas de modificação do meio e a proteção catódica.

a) revestimento; os revestimentos constituem-se em películas interpostas entre o metal e o meio corrosivo, e esta pode dar ao material um comportamento mais nobre ou protegê-lo por ação galvânica, aumentando assim a resistência do material à corrosão.

- b) técnicas de modificação do meio corrosivo: além dos inibidores que agem através do meio corrosivo existem outras técnicas de modificação de meio, dentre elas podemos destacar a desaeração e o controle de pH. A desaeração consiste na retirada de oxigênio do meio, pois sendo este um agente despolarizante, com sua retirada favorece-se a polarização catódica com uma conseqüente diminuição do processo corrosivo.
- c) proteção anódica: a proteção anódica é um método de resistência a corrosão, que consiste em tornar a estrutura a proteger em catodo de uma célula eletroquímica ou eletrolítica, forçando um alto grau de polarização catódica (formação de hidrogênio e outros compostos sobre a superfície do cátodo).

A proteção anódica só pode ser empregada para sistemas que apresentam a transição ativo/passivo, tendo, no domínio de passividade, uma corrente extremamente baixa. O seu emprego encontra maior interesse para eletrólito de alta agressividade, os chamados eletrólitos fortes, como exemplo temos um tanque metálico para armazenar ácidos.

A proteção anódica não propicia só a formação da película protetora mas, principalmente, mantém a estabilidade desta película. Seu emprego é ainda muito restrito no Brasil, porém, existem países onde ela está sendo muito aplicada na indústria química e petroquímica.

- d) proteção catódica: a proteção catódica é empregada em estruturas metálicas enterradas ou submersas, e consiste num método de aumento da resistência à corrosão, que busca tornar a estrutura a que se quer proteger em cátodo de uma célula eletroquímica ou eletrolítica, forçando a um alto grau de polarização catódica.

Vale salientar que não é possível o emprego da proteção catódica em estruturas aéreas, pois nesse processo há a necessidade de um eletrólito contínuo, o que não se consegue na atmosfera.

Em vista desse trabalho se tratar sobre esse tema, iremos dar maior atenção a esse tópico no próximo capítulo.

3 PROTEÇÃO CATÓDICA

A história sobre a proteção catódica está vinculada ao início dos estudos sobre eletroquímica, nos primórdios do século XIX na Inglaterra. Sir Humphrey Davy, em 1823, foi comissionado pelo almirantado britânico para desenvolver uma solução aos problemas de corrosão na chapa de cobre que revestia o casco de madeira dos navios de guerra de Sua Majestade.

Davy combinou seus estudos sobre o referido problema com estudos que já havia publicado, e chegou à conclusão de que a atração química entre corpos pode ser ampliada, modificada ou destruída, por mudanças no estado elétrico dos mesmos. Nessas circunstâncias, as substâncias só se combinarão quando estiverem em diferentes estados elétricos, e quando tornamos um corpo negativo artificialmente cujo estado natural seja positivo, as suas forças de combinação serão completamente destruídas. A fim de transformar tal “estado elétrico”, Davy fez experiências com anodos de ferro, zinco e estanho para proteger o cobre, tendo resultados satisfatórios em diversas condições.

Na década de 20, com o desenvolvimento da indústria do petróleo muitas empresas, principalmente nos Estados Unidos e no Oriente Médio, passaram a usar oleodutos e gasodutos construídos com tubos de aço, os quais eram enterrados sem proteção. Ao final da década, os problemas de corrosão eram grandes e a taxa de crescimento do número de furos alarmante.

Nesse período a proteção catódica volta ao cenário técnico, visando solucionar os problemas nesses gasodutos, foram aplicados revestimentos nos trechos situados nos solos mais agressivos, inicialmente anodos galvânicos e, logo a seguir, sistemas de corrente impressa, usando correntes geradas por cataventos ou empregando retificadores de óxido de cobre.

A partir desta técnica, foi fundada nos Estados Unidos, em 1936, a “Mid-Continent Cathodic Protection Association”, que depois se transformou na NACE-National Association of Corrosion Engineers, que hoje é chamada de NACE international, e a mais importante associação do gênero no mundo.

No Brasil, o emprego da proteção catódica em escala industrial data da década de 60, junto com o desenvolvimento da PETROBRAS, para a proteção dos seus oleodutos submarinos e instalações portuárias, estendendo-se mais tarde a instalações terrestres.

Hoje, a proteção catódica desenvolveu de tal forma, que já constitui um ramo da engenharia especializada e focada em seus métodos, seus equipamentos, materiais, instrumentos, sem os quais não seriam viáveis milhões de tubulações enterradas e submersas, as grandes instalações portuárias em estrutura metálica e as embarcações de todos os portes, com casco em aço, desde os pequenos barcos até superpetroleiros.

3.1 Conceitos

A proteção catódica constituiu no mais eficiente processo para proteger estruturas metálicas constantemente submersas ou enterradas.

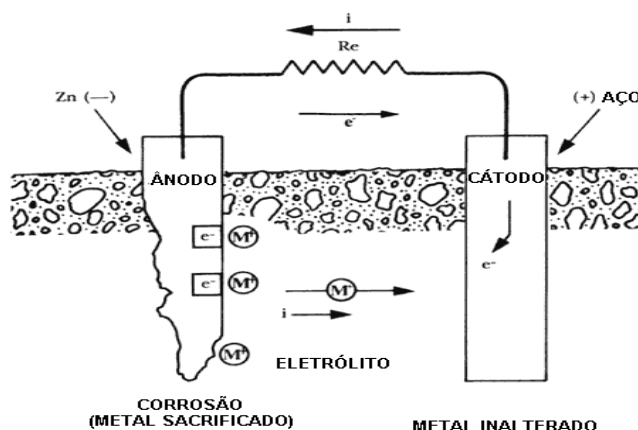
Durante o processo de proteção catódica a estrutura metálica a qual se deseja proteger transformar-se-á em uma pilha artificial, evitando, assim, que a estrutura se deteriore. Consiste basicamente em fornecer a tal estrutura um fluxo de elétrons de forma que se tenha apenas reações catódicas, eliminando-se com isso o desgaste da estrutura.

Em outras palavras, dizer que uma estrutura está protegida catodicamente é fazer com que a mesma se torne um cátodo de uma célula de corrosão.

3.2 Princípios básicos

O princípio da proteção catódica é extremamente simples, uma vez que o processo corrosivo se caracteriza pelo aparecimento de áreas anódicas e catódicas num material metálico, no qual, 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 ânodo para a solução ao mesmo tempo em que os elétrons se dirigem do ânodo para cátodo seguindo o circuito metálico.

Figura 18: Esquema de um anodo de sacrifício



Fonte: <https://sites.google.com/site/scientiaestpotentiaplus/corrosao/corrosao-galvanica>.

Desse modo, o processo de proteção catódica consiste, em através de um processo artificial, transformar superfícies metálicas em catódicas, transportando-se a área anódica para uma nova superfície destinada a este fim, com isso, deixa de existir o fluxo de elétrons originado na área previamente anódica, eliminando-se, portanto, o processo corrosivo.

3.3 Tipos de proteção

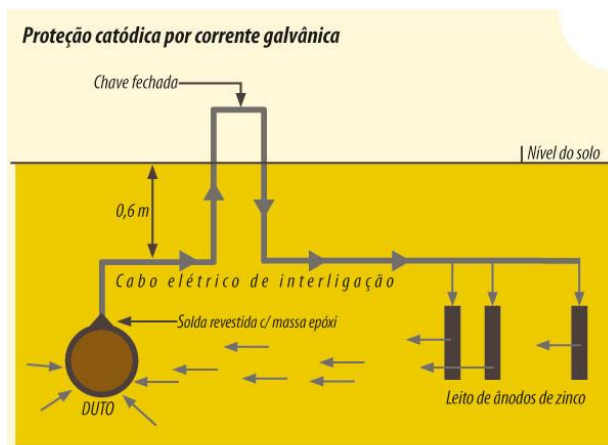
Existem dois métodos para aplicação de um sistema de proteção catódica, ambos baseiam-se no mesmo princípio, ou seja, injeção de corrente elétrica na estrutura através do eletrólito.

A escolha apropriada para a aplicação desses métodos se dá dependendo de análises de várias considerações técnicas e econômicas prévias. A seguir, iremos detalhar esses dois tipos de proteções e veremos suas vantagens e desvantagens.

3.3.1 Proteção catódica galvânica

Na proteção catódica galvânica, a corrente elétrica é promovida pela força eletromotriz existente entre o metal a que se quer proteger e o outro metal escolhido para anodo, como resultado de seus diferentes potenciais eletroquímicos.

Figura 19: Proteção catódica por corrente galvânica



Fonte: Dutra e Nunes, 1999

Fonte: <http://www.quimica.com.br/pquimica/3783/corrosao-melhor-protECAO-catodica-e-revestimentos-controlam-acao-corrosiva-de-dutos/2/>.

Na prática, os metais metálicos mais empregados são ligas de zinco, manganês e alumínio, pois apresentam maior potencial em relação aos materiais metálicos mais comumente usados nas estruturas a serem protegidas, principalmente o aço, como nos cascos de embarcações mercantes, e por possuírem baixíssimas características de polarização anódica.

As principais vantagens da utilização desse processo, tomando como exemplo, uma estrutura submersa, são as seguintes:

- os custos de instalação são baixos;
- menos sujeitos a interrupção no seu funcionamento;
- os custos de manutenção, após o sistema instalado são mínimos; e
- raramente aparecerão problemas de interferência com outras instalações metálicas.

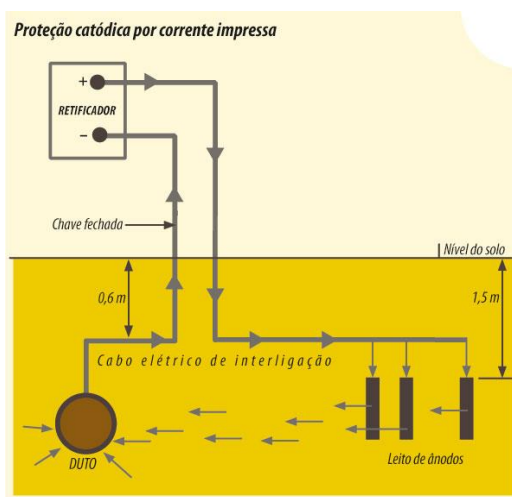
Por outro lado, têm-se as seguintes desvantagens:

- a necessidade de reposição dos anodos após seu consumo;
- a quantidade de corrente fornecida à estrutura é limitada pela diferença de potencial, muito baixa, entre os anodos e a estrutura metálica; e
- se o revestimento da estrutura não for bom, então a proteção com anodos galvânicos ficará muito cara, devido a grande quantidade de anodos a serem instalados.

3.3.2 Proteção catódica por corrente impressa

Esse sistema consiste em promover uma corrente elétrica, através de uma força eletromotriz de uma fonte geradora de corrente contínua, podendo ser: retificador, bateria ou gerador, utilizando um conjunto dispersor de corrente no eletrólito, constituído de anodos inertes, chamado leito de anodos. Esta corrente contínua compara o potencial do eletrodo de referência com a voltagem de erro resultante, determinando a corrente a ser fornecida para o anodo.

Figura 20: Proteção catódica por corrente impressa



Fonte: Dutra e Nunes, 1999

Fonte: <http://www.quimica.com.br/pquimica/3783/corrosao-melhor-protECAO-catodica-e-revestimentos-controlam-acao-corrosiva-de-dutos/2/>.

A grande vantagem desse sistema consiste no fato de que a fonte geradora poderá ser a potência que se deseja, bem como a força eletromotriz necessária, em função das condições de resistividade do eletrólito.

A proteção catódica por corrente impressa se aplica a estruturas situadas em eletrólitos de baixa, média, alta e altíssima resistividade. É, também, indicada para estruturas de médio e grande porte, por ser um sistema mais compacto e mais econômico, quando se necessita de correntes altas para proteção. Entretanto, necessitam de inspeção e manutenção nos retificadores, pois as demais partes são projetadas para um longo período de duração. Esses sistemas são apropriados para estruturas sujeitas a corrente de interferência e permitem, através dos retificadores, ampla regulação. São, devido a sua natureza elétrica, mais sujeita a interrupções no funcionamento.

3.4 Medições do potencial

Ao se utilizar o sistema de proteção catódica a uma estrutura, é muito importante saber se o sistema está cumprindo com sua finalidade, ou seja, está protegendo tal estrutura contra a corrosão em toda sua extensão. Desse modo alguns critérios podem ser adotados para comprovar que a estrutura está protegida e isenta de riscos de proteção, são eles: pela densidade da corrente aplicada e medindo o potencial da estrutura. No entanto, o critério mais usual e mais aceito a nível mundial é pela medição do potencial entre a estrutura e o eletrólito vizinho, medido com um eletrodo de referência.

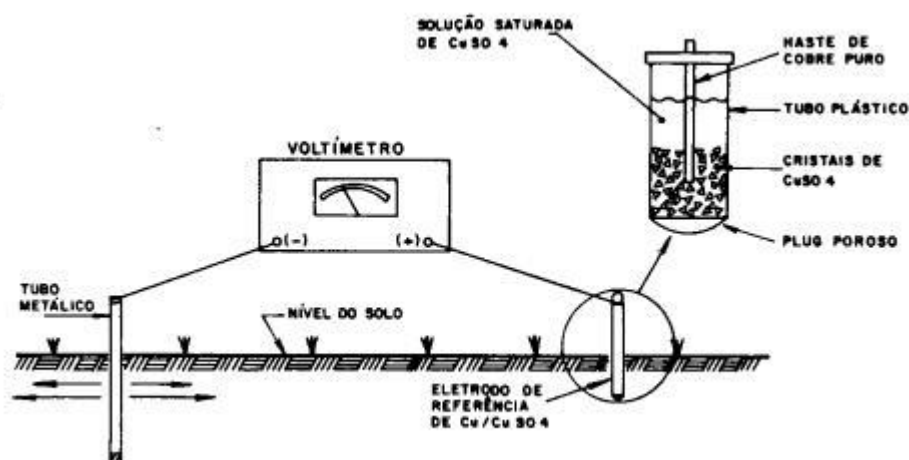
Para a correta escolha do eletrodo de referência, é necessário seguir o seguinte princípio:

- a) quando o eletrodo de referência é para estruturas enterradas, usa-se cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4);
- b) quando o eletrodo é requerido para estruturas imersas em água, empregam-se eletrodos de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl); e
- c) existe a utilização de eletrodos de referência com liga de zinco (Zn), sendo este empregado tanto para estruturas enterradas quanto para submersas.

O instrumento requerido para a medição de potencial é um voltímetro de corrente contínua, estes devem ser robustos, ter alta precisão, alta resistência interna e alta impedância. O valor mínimo exigido de resistência interna para essas condições é de 50.000 Ohm/V. Normalmente usa-se multímetros digitais, pela sua característica de alta impedância interna.

Definido o eletrodo, agora sim é possível começar a medição da estrutura. Se tomarmos como exemplo uma tubulação enterrada, devemos ligar o terminal positivo de um voltímetro digital no ponto de conexão que está conectada ao tubo, e o pólo negativo ao eletrodo de referência que nesse caso iremos considerar cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4), por ser uma estrutura enterrada. O eletrodo de referência deverá ser colocado o mais próximo possível da tubulação, preferencialmente na superfície do solo, e na direção da geratriz superior da tubulação. É necessário assegurar um bom contato entre a extremidade do eletrodo e o solo, e no caso de solo seco fazer um umedecimento prévio. Depois de respeitadas todas as considerações obteremos uma leitura cujo sinal será efetivo do potencial.

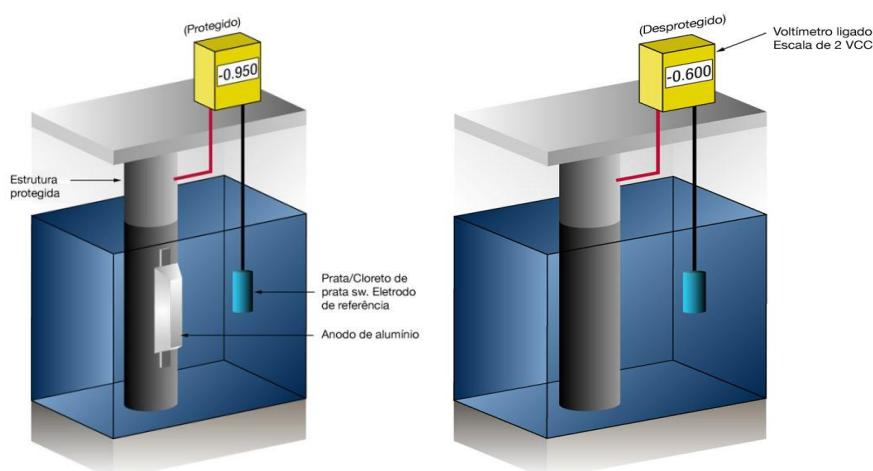
Figura 21: Medição do potencial, em relação ao solo, de qualquer material metálico (potencial estrutura/solo)



Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFtqkAC/livro-sistemas-protecao-catodica-gomes>.

No caso de uma estrutura submersa o procedimento não seria tão diferente, porém, será necessário atentar que usaríamos prata/cloreto de prata (Ag/AgCl), o qual também deverão ser posicionados o mais próximo possível da estrutura, sendo que para isto ocorra, é mais conveniente variar o eletrodo de referência em diferentes profundidades. No demais, a ligação entre o voltímetro e as peças acontecem de forma semelhante ao caso da tubulação enterrada, liga-se o terminal positivo ao ponto de conexão da estrutura e o pólo negativo ao eletrodo de referência obtendo-se assim uma leitura cujo sinal será efetivo do potencial.

Figura 22: Medição do potencial de proteção catódica (Esquerdo desprotegido – Direito protegido)



Fonte: <http://www.cathodicprotection101.com/protecao-catodica.htm>.

Outra consideração a se fazer é em relação ao chamado “potencial remoto”, que ocorre de forma mais expressiva com tubulações enterradas. O potencial remoto ocorre quando se coloca o eletrodo de referência muito distante da estrutura, então, diz-se que a posição de um eletrodo de referência é considerada remota, pois, a partir de certo afastamento, o potencial obtido dessa medição em diante passa a ser constante.

Todos os valores de potencial deverão ser anotados para análise global e registro de inspeção. Caso existam eletrodos de referência fixos, em pontos estratégicos na estrutura, os valores encontrados darão uma idéia geral do nível de estrutura, o que não excluirá a necessidade de um levantamento de potencial mais completo.

3.5 Inspeção e manutenção

Independente do sistema instalado na estrutura a que se quer proteger, podendo variar entre a proteção catódica por anodos galvânicos ou por corrente impressa, é necessário estabelecer um programa de acompanhamento que possibilite os ajustes necessários em tempo útil.

Quando se fala de sistemas galvânicos, para verificar um potencial entre uma estrutura e um eletrodo de referência, como por exemplo, de prata/cloreto de prata, deve-se proceder a uma inspeção no sistema. Do resultado da inspeção e o potencial obtido ditará quais as medidas a serem adotadas, caso seja constatado um completo desgaste dos anodos, esses deverão ser substituídos. Entretanto, se forem observados eventos, tais como ausência de desgaste, desgaste irregular, ou outras anomalias, o problema deverá ser estudado com maior profundidade.

Em unidades marítimas com sistemas de corrente impressa são recomendáveis três modalidades e freqüências de verificação de potencial eletroquímico:

- a) semanal: diretamente no retificador, através dos eletrodos de referencia fixos;
- b) trimestral ou Semestral: através de eletrodo de referência portátil, calibrado, em pelo menos 20 pontos preestabelecidos; e
- c) a cada 2,5 anos: através de medição submersa local (via mergulhadores), em pelo menos 40 pontos preestabelecidos.

Vale ressaltar que no que se refere a sistemas de corrente impressa os trabalhos de manutenção recaem na maioria das vezes sobre os retificadores, os quais requerem, por vezes, apenas ajustes do “set-point”, substituição de fusíveis ou até mesmo de elementos retificadores como diodos ou tiristores. Quando for necessário utilizar retificadores imersos em óleo, este deve ser examinado com uma periodicidade, de aproximadamente seis em seis meses, de modo a se providenciar sua substituição numa época apropriada. Com relação aos anodos inertes, a ocorrência de falhas no corpo do anodo também é reduzida, porém quando nos referimos as instalações marítimas os defeitos podem ocorrer em cabos, conexões e no próprio encapsulamento da conexão elétrica entre o cabo e o anodo.

Uma atividade que tem aumentado no meio marítimo é a intervenção submarina nos sistemas de proteção catódica para a substituição total dos componentes submersos devido ao fim da vida útil do sistema. Embora estes problemas não sejam freqüentes, eles devem ser solucionados de modo a evitar o comprometimento da integridade da instalação.

A interrupção no sistema de proteção catódica não provoca, em curto prazo, prejuízos castatráficos. Entretanto, se as paralisações forem constantes, a médio e longo prazo pode-se contar com prejuízos dessa natureza, portanto, promover a instalação de um sistema de proteção catódica sem atentar para sua manutenção é um desperdício de recursos.

3.6 Custos de um sistema de proteção catódica

O cálculo dos custos, para o emprego de um sistema de proteção catódica, deve levar em consideração alguns parâmetros importantes, que são:

- a) custos do levantamento de dados de campo;
- b) custos referentes ao projeto;
- c) custos dos materiais a serem aplicados;
- d) custos com a instalação; e
- e) custos da manutenção.

Levando-se em conta esses parâmetros, pode-se dizer que é inviável realizar um cálculo antecipado. Porém, como esses componentes dependem basicamente da fase de projeto, que está ligado aos dados obtidos na fase de levantamento de

campo, uma vez realizado o levantamento de campo, será possível estabelecer o custo para a implantação do sistema.

A fim de realizar uma boa fase de levantamento de dados de campo, devemos saber quais são os dados que mais influenciam na composição dos custos, são eles:

- a) qualidade do revestimento empregado;
- b) disponibilidade de corrente alternada para a alimentação dos retificadores;
- c) correntes de interferência na região; e
- d) dimensionamento e tipo de instalação a que se quer proteger.

Dispondo desses dados, o engenheiro responsável pela implantação do sistema de proteção catódica poderá definir o sistema mais adequado, a melhor técnica e controlar os custos para o caso em estudo.

4 APLICAÇÃO PRÁTICAS NA MARINHA MERCANTE

As instalações marítimas constituem ampla gama de estruturas, onde a proteção catódica tem vasto emprego. É o caso de píers, bóias de sinalização, amarras, bem como embarcações metálicas de qualquer tipo, além das plataformas metálicas, dos mais variados tipos, utilizados na exploração e na produção de petróleo, no mar.

O sistema de proteção catódica aplica-se também à parte interna de equipamentos como tubulações que transportam água e câmaras internas de trocadores de calor, em contato com água de refrigeração, doce ou salgada. No decorrer deste capítulo serão apresentadas algumas estruturas onde é comum o uso do sistema de proteção catódica, e será definido o tipo de proteção mais adequada a tal estrutura.

4.1 Proteção catódica em embarcações

Para embarcações pequenas, com casco de aço usa-se apenas o sistema galvânico, por ser vantajoso o emprego de anodos de liga de alumínio. Ao calcularmos a massa e o número de anodos, devemos levar em conta a vida útil, sendo esta geralmente de dois anos. A massa calculada deve ser acrescida de 5 a 10% do valor encontrado. Esse acréscimo destina-se ao aumento do número de anodos a serem instalados na zona de ré, para atenuar a ação galvânica provocada pelo hélice, que é feito de material bem mais nobre que o aço.

Para os cálculos de massa e número de anodos, utilizamos as seguintes expressões:

$$M = \frac{8760 \times V \times I}{F \times C}$$

Onde:

M= massa de anodo requerida, em kg;

V= vida útil desejada, em ano;

I= corrente requerida, em ampéres;

C= capacidade de corrente do material do anodo, em A.h/kg;

F= fator de utilização (adimensional).

Sendo que o fator de utilização F refere-se ao percentual de massa do anodo que é consumido, proporcionando a proteção desejada. Quando o anodo está prestes a extinguir-se, ele perde a capacidade de produzir corrente para a proteção da estrutura. Desse modo, nasceu o conceito de fator de utilização, e adotou-se um valor de 0,85, isto é, admite-se que até um percentual de 85% do anodo consumido, o mesmo continua liberando corrente e, portanto, ainda é capaz de manter a estrutura protegida. Para anodos que apresentam formas alongadas, esse valor pode ser elevado para 0,90.

$$N = \frac{M}{m}$$

Onde:

N = número de anodos;

M = massa total requerida, em kg;

m = massa unitária do tipo de anodo selecionado, excluindo a alma de aço, em kg.

Outro fator importante é conhecer a área externa do casco de uma embarcação. O cálculo preciso desta área externa é complexo, por isso usa-se uma fórmula simplificada, atribuída a Taylor, plenamente satisfatória para fins de proteção catódica. Esta fórmula permite o cálculo da área molhada do casco de uma embarcação, também denominada de obras vivas, sendo:

$$S = C\sqrt{\Delta L}$$

Onde:

S = área molhada, em m^2 ;

Δ = deslocamento, em tonelada de peso bruto (tpb);

L = comprimento entre perpendiculares, em m;

C = constante (ver tabela a seguir)

Tabela 1: Valores médios de C

Relação B/H(*)	Valor de C		
	Navios	Rebocadores	Embarcações pequenas
2,0	2,64	2,84	3,04
2,5	2,56	2,77	2,99
3,0	2,54	2,72	2,91
3,5	2,57	2,70	2,82
4,0	2,63	2,72	2,81

(*) B= boca moldada, em; H= calado em carga máxima, em.

Fonte: livro proteção catódica: técnica de combate à corrosão.

Quando mencionamos embarcações devemos considerar a proteção externa do casco, a proteção interna dos tanques de lastro que transportam água salgada e, ainda, os carretéis dos permutadores de calor e outros equipamentos que eventualmente operem com água do mar e, portanto, haverá uma melhor explanação sobre cada situação.

4.1.1 Proteção do casco

O cálculo da proteção catódica externa do casco segue o roteiro já indicado, porém, pode-se usar tanto anodos galvânicos como sistemas de corrente impressa. Quando se usa anodos galvânicos, é importante observar que a zona de ré requer maior número de anodos, e que não se deve colocar anodos diretamente ao hélice.

Figura 23: Placas de zinco colocadas diretamente em contato com o casco



Fonte: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/protecao-dos-metais-contra-corrosao.htm>.

A tendência mais moderna em navios é o emprego do sistema de corrente impressa. As condições de solicitação de corrente no casco de um navio variam em grande amplitude, sendo as condições mais críticas aquelas que ocorrem quando ele está em plena carga e, portanto, com calado máximo, navegando em mar aberto. A solicitação de corrente mínima quando ele está totalmente descarregado, calado mínimo, e ancorado em baía, contaminada com água doce, em geral, de alta resistividade elétrica.

O atendimento da corrente requerida, nessa variedade de condições a que os navios se encontram, é proporcionado pelo emprego de retificadores dotados de controle de potencial. Para tanto, são instalados eletrodos de referência permanentes, sendo os de titânio platinizado e liga de chumbo-antimônio-prata os de uso mais frequente. Estes se caracterizam por sua forma mais alongada e seção transversal delgada, e são colocados em locais estratégicos, por meio dos quais o potencial entre o casco e a água atuará no circuito de controle do retificador, ajustando a corrente de saída às reais necessárias para a proteção.

A instalação dos anodos é um ponto crítico do sistema, pois é necessário que haja um completo isolamento elétrico entre o anodo e o casco. Por outro lado, como se trata de conexões mergulhadas, a vedação tem que ser feita de forma perfeita, para evitar a infiltração de água. O outro ponto crítico é a interligação da estrutura com o eixo do hélice, a qual é feita por intermédio de escovas de grafite, a exemplo das escovas utilizadas em motores elétricos e geradores de corrente contínua.

Quando o sistema de proteção catódica por corrente impressa é utilizado no casco de navios, estende-se tal proteção ao próprio hélice, de modo a atenuar ou até mesmo eliminar os problemas de cavitação que eventualmente ocorram. Para que isto ocorra, é necessário que o potencial entre hélice e água situe-se na faixa de 50 a 100mV mais negativo que o casco.

4.1.2 Proteção dos tanques de lastro

A proteção interna dos tanques de lastro é feita por intermédio de anodos galvânicos. Os anodos empregados pelo sistema de proteção catódica são ligas de alumínio e zinco, por suas características técnicas e custo atraente. Porém, em decorrência de algumas experiências, principalmente em navios petroleiros, foi identificado que anodos de alumínio, em queda livre, acima de determinada altura,

poderiam originar centelhas, considerando que o ambiente dentro desses tanques é considerado explosivo para esses tipos de navios, foi determinada uma altura mínima em relação ao fundo do tanque para evitar que a energia liberada decorrente de tal queda pudesse produzir esse centelhamento.

Já os anodos de liga de zinco, não apresentam nenhuma restrição quanto ao seu uso.

Os anodos são distribuídos ao longo de toda a estrutura interna dos tanques, com especial cuidado para as superfícies horizontais do fundo, que acumulam água com maior facilidade. Sendo importante levar em consideração durante a instalação tanto os locais o qual serão instalados, para que posteriormente as limpezas não sejam prejudicadas, quanto a resistividade elétrica da água de lastro, para que seja feito o melhor dimensionamento da vida útil desses anodos.

4.1.3 Trocadores de calor

Os trocadores de calor usados a bordo de navios podem ser utilizados como condensadores e resfriadores e, geralmente são constituídos por aço carbono, tendo seus tubos revestimentos em cobre ou uma de suas ligas. É comum ver carretéis, tampos e espelhos em aço carbono e tubos em latão revestidos de alumínio. Estes materiais, juntos e em contato com a água do mar, formam um par galvânico e dão origem ao processo de corrosão galvânica, em que o aço será atacado. Então, é imprescindível o uso do sistema de proteção catódica para eliminar esta ação corrosiva e, para isto, tanto podemos usar anodos de liga de zinco, quanto os de liga de alumínio.

Para o cálculo do emprego do sistema de proteção catódica para os trocadores de calor, utiliza-se uma fórmula empírica, onde, a massa calculada deve ser a massa mínima a ser usada, desde que seja respeitada a área exposta dos anodos. Não sendo, para efeito de cálculo, necessário utilizar a área de face do anodo em contato com a estrutura.

A superfície do anodo requerida será dada pela seguinte fórmula:

$$S = 0,078 (0,75 D^2 + 6 N d^2)$$

Onde:

S= superfície requerida de anodo, em cm²;

D= diâmetro do círculo do espelho, exposto à água, em cm (o espelho é considerado como se não houvessem tubos e o mesmo não fosse furado);

D= diâmetro interno dos tubos, em cm;

N= número de tubos expostos.

A massa de anodo de zinco será dada, por:

$$M_{Zn} = 0,00324 S$$

Onde:

M_{Zn} = massa de anodos de liga de zinco, em kg;

S= superfície requerida de anodos, em cm² (área obtida pela fórmula anterior).

No caso do emprego de anodos de liga de alumínio, a área de anodos requerida é obtida pela mesma equação, porém a massa de anodos é obtida pela fórmula:

$$M_{Al} = 0,00054 S$$

Sendo o S já definido.

4.2 Instalações portuárias

As instalações portuárias são áreas submetidas ao regime alternadamente imerso, durante a maré alta e emerso, no período de maré baixa, seguida de outra região em que a superfície está permanentemente em contato com a água, devido aos respingos de água do mar. Nesta zona, se tem maior agressividade ao meio, associada à dificuldade de se proporcionar proteção catódica, pela falta de eletrólito permanente para conduzir a corrente de proteção.

Para solucionar este problema alguns profissionais têm utilizado um revestimento metálico, com material nobre, particularmente uma liga de níquel-cobre, tradicionalmente conhecida por Monel. Esta liga apresenta excelente resistência tanto a ação da água do mar, como à agressividade da atmosfera marítima. Porém, é ainda pouco utilizada pelo seu custo elevado, e por ser um material muito nobre, ele formará junto com a estrutura de aço submersa uma forte pilha galvânica, ocasionando duas situações, são elas:

- intensa corrosão do aço, caso não haja sistema de proteção catódica; e

- diminuição da eficiência do sistema de proteção catódica no período de maré alta, para uma situação em que esse sistema ocorra, devido a corrente que passará pela superfície do Monel.

Outra solução consiste no emprego de um revestimento orgânico. Este revestimento trata-se de um material de características muito particulares que permite aplicação em superfície submersa na água salgada. Este material é essencialmente uma massa à base de epoxi-poliamida, sua aplicação é manual e possibilita um revestimento de 3 a 5 mm de espessura.

4.3 Plataformas marítimas

A grande maioria de plataformas marítimas são dotadas de um sistema de proteção catódica do tipo galvânica, porém, já se tem visto em alguns casos a utilização do sistema de corrente impressa e, também, sistema misto. Num sistema misto, o sistema galvânico é utilizado para atender ao período que vai desde o lançamento da jaqueta até a ocasião em que a plataforma entra em operação definitiva, dispondo de energia elétrica. A partir deste período, a proteção é dada por meio de corrente impressa.

Um ponto crítico no sistema de proteção catódica de uma jaqueta é a distribuição de corrente elétrica ao longo da estrutura. A existência de nós, com grande número de elementos estruturais, cria uma condição de blindagem, dificultando o acesso nas reentrâncias, que são os pontos mais desfavoráveis.

Com o sistema galvânico, esta dificuldade pode ser melhorada mediante a implantação de anodos junto a esses nós, de modo a prover, ali, a corrente necessária. Quando se usa corrente impressa, a solução torna-se mais difícil, pois a corrente liberada pelos anodos é normalmente muito elevada, tornando-se inconveniente colocá-los muito próximos dos mesmos.

Nas plataformas existem ainda as tubulações que conduzem o petróleo, provenientes de formação geológica, estes se encontram em temperatura bem elevada, e são mantidos constantemente aquecidos, são os chamados risers. Esta é uma condição muito crítica, pois, a elevação da temperatura introduz um aumento na corrente requerida e, para manter o mesmo grau de proteção é necessário requerer uma densidade de corrente de proteção de valores muito elevados, a qual pode ser calculada pela expressão:

$$d = d_0 + 2\Delta t$$

Onde:

d = densidade de corrente na temperatura considerada, em mA/m²;

d_0 = densidade de corrente à temperatura ambiente, em mA/m²;

Δt = diferença de temperatura acima da ambiente, em °C.

Já para o cálculo da resistência de contato entre anodo e a água, para pequenas profundidades, como no caso de instalações portuárias, e o cálculo dessa mesma resistência, quando o anodo se encontra em águas mais profundas. Existe a fórmula de Dwight, já conhecida:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{D} - 1 \right)$$

E a fórmula para o cálculo dessa resistência quando o anodo se encontra numa profundidade suficientemente grande para ser considerada como infinita, será:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{D} - 1 \right)$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do que foi exposto durante todo trabalho espera-se ter ficado claro, que a corrosão é um ponto crítico na área naval e, portanto, o porquê do desenvolvimento de sistemas de proteções anticorrosivas, mas precisamente a abordada no decorrer deste trabalho, a proteção catódica que objetivou-se em solucionar tal problema e, pela busca por equipamentos mais eficazes, seguros e economicamente acessíveis. Com base nisso, a realização de inspeções e manutenções são capazes de manter o sistema em bom estado e diminuir gastos desnecessários.

Dessa forma, ao término desta pesquisa, a autora acredita que chamará a atenção do leitor, com base na tentativa de apresentar um novo ponto de vista, e ao mesmo tempo tentar ratificar conhecimentos importantes já adquiridos sobre o sistema de proteção catódica voltado a embarcações mercantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CÉSAR, João Paulo. **Proteção catódica**. 1983. Monografia (Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas) - CIAGA, Rio de Janeiro, 1983.

DUTRA, Aldo Cordeiro; Nunes, Laerce de Paula. **Proteção catódica: técnica de combate à corrosão**. 3ª Ed Interciência: 1999.

GOMES, Renato Eduardo de Souza; Nogueira, Sávio Gomes da Silva; Santos, Luis Augusto de Melo Santos. **Tecnologia dos dutos de extração de petróleo**. Revista de Divulgação do Projeto da Universidade Petrobras e Fluminense, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 239-243. 2012.

MARTINELLI JÚNIOR, Antônio Carlos. **Técnicas anticorrosivas para cascos: proteção catódica e corrente impressa**. 2013. Monografia (Curso de aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas) - CIAGA, Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, José Antônio Moreira da. **Proteção catódica e sua aplicação naval**. 1984. Monografia (Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas) - CIAGA, Rio de Janeiro, 1984.