UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
DIEGO RAFAEL PIRES
NILTON DE SÁ JÚNIOR

PROTEÇÃO CATÓDICA:
USO NO CONCRETO ARMADO.

Palhoça

2018

DIEGO RAFAEL PIRES
NILTON DE SÁ JÚNIOR

PROTEÇÃO CATÓDICA:
USO NO CONCRETO ARMADO.

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Professora Eng. Fernanda Soares de Sousa Oliveira, Msc.

Palhoça
2018

DIEGO RAFAEL PIRES
NILTON DE SÁ JÚNIOR

PROTEÇÃO CATÓDICA:
USO NO CONCRETO ARMADO.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 07 de novembro de 2018

Prof. e Orientador Eng. Fernanda Soares de Souza Oliveira, Msc.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Eng. Valdi Henrique Spohr, Msc.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Eng. Ricardo Cesconetto dos Santos, Esp.
Agência de Regulação de Serviços Públicos de Santa Catarina - Aresc.

AGRADECIMENTOS – DIEGO RAFAEL PIRES

Gostaria de agradecer a Deus pela dádiva da vida, por me fortalecer nos momentos difíceis e me dar a alegria de mais um objetivo cumprido.

Um agradecimento especial para as pessoas mais importantes da minha vida, minha esposa Gisela Daiane da Silva Pires e minha filha Heloísa da Silva Pires, por toda compreensão e paciência demonstrada ao longo do curso. Por aceitarem a minha ausência em muitos momentos, por me incentivarem, mesmo em momentos conturbados, a continuar em busca dos meus objetivos, me apoiando em todos os momentos.

Meu sincero agradecimento ao amigo Nilton de Sá Júnior por me convidar a fazer mais uma caminhada ao seu lado..

Agradecimento especial a todos os professores pelo compartilhamento de seus conhecimentos. À professora, Eng. Fernanda Soares de Sousa Oliveira, Msc por sua paciência e alegria em ajudar a todos os seus orientandos.

Deixo o meu agradecimento a todos os amigos que me acompanharam ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS – NILTON DE SÁ JÚNIOR

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me dar forças para lutar e não desistir de meus objetivos, mesmo diante de tantos obstáculos ao longo da vida.

À minha esposa Eng. Gabriela Rodrigues de Sá, companheira de todas as horas que sempre me deu forças, principalmente, nas horas de cansaço físico e mental.

Ao meu filho Isaac Rodrigues de Sá, que durante as várias noites de estudo, entrava no escritório, antes de dormir, para me dar um beijo e desejar "boa noite, papai".

Agradeço também ao meu amigo Diego Rafael Pires, por me ajudar nesta conquista. Um cara excepcional, que topou o desafio de cursar Engenharia Civil após nos formamos no curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Santa Catarina, dois cursos desafiadores, ao lado desse guerreiro. Aos meus amigos Jean Carlos Machado e Ricardo Cesconetto dos Santos, pelas ajudas prestadas e palavras de incentivo.

Deixo também um agradecimento a todos os professores e amigos da Unisul, que foram essenciais para minha formação acadêmica. Um agradecimento especial à Professora Eng. Fernanda Soares de Sousa Oliveira, Msc, pessoa de sorriso fácil, que topou nos orientar nesse trabalho. Aqueles amigos que contribuíram de maneira

"O *conhecimento serve para encantar as pessoas*,

não para humilhá-las".

(MÁRIO SÉRGIO CORTELLA)

RESUMO

Esta pesquisa objetiva estudar o uso da proteção no aço do concreto armado em ambiente agressivo como os ambientes litorâneos a fim de avaliar a efetividade do sistema de proteção catódica. Tendo em vista que desde o momento em que os seres humanos iniciaram a utilização dos metais extraídos da natureza, a corrosão tem sido a causa mais importante da deterioração destes materiais. Isso porque as reações de corrosão podem ser interpretadas como a liberação da energia utilizada para produzir estes materiais com o intuito de voltar naturalmente ao estado físico inicial, ou seja, tais reações são espontâneas. Com o desenvolvimento industrial, os seres humanos entraram plenamente na era do aço e milhares de diferentes tipos de aço foram desenvolvidos a fim de atender inúmeras finalidades. No entanto, sua resistência à corrosão, ao desgaste tem sido uma preocupação constante. Dentre os vários métodos de combate a corrosão, o lugar de destaque é ocupado pela PROTEÇÃO CATÓDICA que, dentro de seu campo de aplicação, elimina por completo tais processos, tornando o material metálico imune ao seu ataque. É por meio do uso da proteção catódica que milhões de quilômetros de tubulações enterradas operam com segurança.

Palavras-chave: Corrosão. Proteção Catódica. Concreto Armado.

ABSTRACT

This research aims at studying the use of protection to steel which is used in Reinforced Concrete (RC) in hostile environments, such as coastal construction sites, to assess the effectiveness of the use of the CP (Cathodic Protection) system. Bearing in mind that since the moment humankind has started to utilize materials extracted from the environment, corrosion has been the most significant cause of deterioration to these materials. This is due to corrosive reactions, interpreted as the liberation of the energy which has been used to produce such materials, intending to return to their natural physical state as a spontaneous reaction. Moreover, after the industrial development, humankind has fully entered a 'steel-age' in which several steel varieties have been created to fulfill numerous different needs. However, its lack of resistance to corrosion and deterioration has become a major concern over the years. Among a vast number of techniques to avoid corrosion, the Cathodic Protection one has occupied a privileged spot due to its efficiency in making the material (steel) immune to the action of corrosion by eliminating the process of deterioration on the area of its application. Additionally, it is with the use of CP that millions of kilometers of underground piping operate safely on a daily basis.

Keywords: Cathodic Protection, steel, corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema célula eletroquímica 20
Figura 2 - Esquema de formação de região anodo e catodo em barra de aço 23
Figura 3 - Reação anódica 24
Figura 4 - Equilíbrio entre o metal e o eletrólito 24
Figura 5 - Eletrodo de hidrogênio 25
Figura 6 - Eletrodo de Zinco e eletrodo de Hidrogênio ligados por ponte salina 26
Figura 7 - Eletrodo de Cobre e eletrodo de Hidrogênio ligados por ponte salina 26
Figura 8 - Taxa de corrosão do aço em função da concentração de NaCl. 33
Figura 9 - Pilha de corrosão galvânica 36
Figura 10 - Mecanismo de proteção catódica visto pelas curvas de polarização 37
Figura 11 - Sistema de proteção catódica galvânica 38
Figura 12 - Sistema de proteção catódica por corrente impressa 39
Figura 13 - Variação da densidade de corrente de proteção 42
Figura 14 - Fator de correção da corrente em função do eletrólito. 44
Figura 15 - Composição dos enchimentos condutores para anodos galvânicos 49
Figura 16 - Esquema de um anodo galvânico instalado no solo 51
Figura 17 - Instalação de pastilhas de proteção 65
Figura 18 - Tela galvânica de proteção 66
Figura 19 - Jaqueta galvânica 69
Figura 20 - Esquema de instalação do anodo em torre de transmissão 71
Figura 21 - Esquema de proteção de estacas 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Série eletromotriz - potencial padrão de alguns metais.....27
Tabela 2 - Série Galvânica em água do mar.....28
Tabela 3 - Tipos de anodos e seus locais de uso 40

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 - Armadura em aço sem revestimento 53
Imagem 2 - Corpos de prova moldados 58
Imagem 3 - Simulação de falhas na concretagem 59
Imagem 4 - Ligação elétrica na armadura do CP01 60
Imagem 5 – Detalhe da ligação entre a armadura.e o anodo 60
Imagem 6 - Corpos de prova submetidos a um meio aquoso a 3% de NaCL 61
Imagem 7 - Início do processo de corrosão do aço no CP02 61
Imagem 8 - Início do processo de corrosão do aço no CP01 62
Imagem 9 - Corrosão do aço - importância do meio eletrólito 62
Imagem 10 - CP02 com 10 dias de ensaio 63
Imagem 11 - CP01 com 10 dias de ensaio 63
Imagem 12 - CP02 com 40 dias de ensaio 64
Imagem 13 - CP01 com 40 dias de ensaio 64
Imagem 14 - Furos para efetuar a ligação elétrica entre o ânodo e cátodo 67
Imagem 15 - Instalação dos ânodos 67
Imagem 16 - Encamisamento do sistema de proteção 68
Imagem 17 - Proteção catódica em obras portuárias 68
Imagem 18 - Proteção catódica em estacas utilizando jaquetas galvânicas 69
Imagem 19 - Recuperação e proteção catódica de vigas no Porto de Canaveral - Flórida 70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 JUSTIFICATIVA 15
1.2 OBJETIVOS 16
1.2.1 Objetivo geral 16
1.2.2 Objetivos específicos 16
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO 16
1.4 MÉTODO DA PESQUISA 16
1.5 ESTRUTURA GERAL DO TRABALHO 17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 CONCRETO ARMADO 19
2.2 CORROSÃO 19
2.2.1 Mecanismo eletroquímico e eletrolítico da corrosão 20
2.2.2 Potencial de eletrodo ou potencial eletroquímico 23
2.2.3 Tipos de corrosão 29
2.2.3.1 Corrosão galvânica 29
2.2.3.2 Corrosão em frestas 29
2.2.3.3 Corrosão atmosférica 29
2.2.3.4 Corrosão pelo solo 30
2.2.3.5 Corrosão pela água 31
2.2.3.6 Corrosão em concreto 31
2.3 PROTEÇÃO CATÓDICA 33
2.3.1 História 34
2.3.2 Campo de aplicação 34
2.3.3 Mecanismo básico 35
2.3.4 Tipos de proteção 37
2.3.4.1 Proteção catódica galvânica 37
2.3.4.2 Proteção catódica por corrente impressa 39
2.3.5 Corrente requerida para proteção 41
2.3.5.1 Densidade de corrente de proteção 41
2.3.5.2 Eficiência dos revestimentos 43
2.3.5.3 Fator de velocidade 43
2.3.5.4 Área a proteger 44
2.3.5.5 Coeficiente de segurança 45
2.3.5.6 Cálculo da corrente requerida 45
2.3.6 Dimensionamento do sistema galvânico para estruturas marítimas 45
2.3.7 Dimensionamento do sistema de proteção catódica galvânica para estruturas enterradas 49
2.3.7.1 Enchimento condutor 49
2.3.7.2 Cálculo da corrente liberada por um anodo enterrado no solo 50

3 EXPERIMENTO E RESULTADOS **52**
3.1 CÁLCULOS E CONSIDERAÇÕES ADOTADAS 52
3.1.1 Densidade de corrente de proteção **52**
3.1.2 Eficiência dos revestimentos **52**
3.1.3 Fator de velocidade **53**
3.1.4 Área a proteger **53**
3.1.5 Coeficiente de segurança **55**
3.1.6 Cálculo da corrente requerida **55**
3.1.7 Cálculo da massa dos anodos **55**
3.1.8 Cálculo do número de anodos **55**
3.1.9 Cálculo da resistência do circuito **56**
3.1.9 Cálculo da corrente liberada por um anodo **57**
3.1.10 Cálculo da corrente liberada pelos N anodos **57**
3.2 EXPERIÊNCIA 58
4 APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL **65**
4.1 PROTEÇÃO DE PEQUENAS ÁREAS 65
4.3 PROTEÇÃO EM PILARES DE PONTES 66
4.4 PROTEÇÃO EM PIER E ESTRUTURA PORTUÁRIA 68
4.5 PROTEÇÃO DE FUNDAÇÕES 70
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS **72**
REFERÊNCIAS **73**

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é o tipo de estrutura mais utilizado no meio da construção civil e diferencia-se do concreto, pelo fato de receber uma armadura metálica frouxa na sua composição. Garantir a existência de excelentes condições técnicas estruturais por um longo período de tempo é um grande desafio quando se aborda a questão da proteção da armadura contra a corrosão.

A corrosão, de acordo com a conceituação mais moderna, é a deterioração dos materiais pela ação do meio. Como resultado deste enfoque mais amplo, quando se trata de metais, o fenômeno é denominado de "corrosão metálica". Ainda que, na prática, continua-se falar simplesmente corrosão. Nesse caso, ela é conceituada como a destruição dos materiais metálicos pela ação química ou pela eletroquímica do meio, à qual pode estar, ou não, associada a uma ação física (DUTRA; NUNES, 2011).

O processo de corrosão da armadura metálica que compõe o concreto armado cria condições para o aumento da taxa de ataque. Isto se deve ao fato de os produtos da corrosão do ferro e do aço terem um volume específico maior do que o volume do próprio aço, causando tensões que podem resultar na fissura do concreto. Dentre as tentativas de proteção, destacam-se a galvanização, a pintura, a redução da permeabilidade do concreto, o aumento da profundidade de cobertura, que são, em geral, dirigidas para os revestimentos do aço. Tais medidas preventivas têm algum grau de sucesso, mas não comparável à proteção catódica.

Sabe-se que a proteção catódica é um processo ativo de controle contra a corrosão de metais, tendo em vista que o princípio básico é tornar o elemento metálico a ser protegido em um cátodo de uma célula de corrosão, o que pressupõe a presença de um ânodo. Assim, o processo natural de perda de elétrons da estrutura para o meio, fenômeno que causa a corrosão, é compensado pela ligação da estrutura metálica a um ânodo de sacrifício, em geral, um eletrodo de cobre/sulfato. Dessa forma, o direcionamento da corrente elétrica preserva a estrutura metálica, ocorrendo corrosão controlada no ânodo (VINÍCIUS ABBATE, 2003).

Este trabalho abordará o uso do sistema de proteção catódica nas armaduras contidas em fundações rasas localizadas num meio de agressividade alto.

1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar de toda revolução tecnológica que a construção civil sofreu nas últimas décadas, o concreto é o grande protagonista. De acordo com a revista Corrosão & Proteção (2015), a corrosão da armadura continua sendo a patologia que mais acomete as estruturas de concreto armado, uma vez que a corrosão da armadura está diretamente ligada com o meio de agressividade do qual a estrutura está submetida.

A revista Corrosão & Proteção (2015) levanta as possibilidades de proteção da armadura, o método a ser aplicado deve ser avaliado pelo projetista.

> De maneira geral, as alternativas de proteção de estrutura de concreto estão associadas a quatro formas clássicas de controle: substituição do material por outro mais resistente, modificação do meio de exposição, interposição de barreiras entre o meio e o metal e fornecimento de energia ao sistema (CORROSÃO & PROTEÇÃO, 2015, p.11).

Cascudo (1997, p. 6) fortalece a afirmação de que a patologia que mais acomete estruturas de concreto no Brasil é a corrosão da armadura, o principal motivo levantado é pela proximidade do mar, onde existe mais concentração de cloreto. No caso de cidades afastadas do mar, porém com alto nível de poluição, o índice de agressividade do meio também aumenta.

No estado do Ceará, Silva (2011) realizou um estudo, em diferentes obras, em virtude da patologia de corrosão da armadura se mostrar presente em 97% das obras analisadas.

Sabendo da frequência com que as obras de construção civil são prejudicadas pela ação da corrosão, é de fundamental importância utilizar técnicas que objetivem, principalmente, aumentar a vida útil da estrutura e reduzir os gastos com intervenções. Portanto, a escolha da proteção da armadura utilizada no concreto armado deve ser de responsabilidade do projetista; no entanto, será uma barreira se houver falta de conhecimento sobre o assunto o que implica uma escolha incorreta, mesmo na opção de não executar a proteção extra, além da camada de cobrimento do concreto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Apresentar um estudo sobre o uso da proteção catódica como instrumento de controle dos diversos tipos de corrosão que acomete o aço.

1.2.2 Objetivos específicos

- levantar dados bibliográficos sobre os processos de corrosão e seus tratamentos;
- apontar as vantagens e desvantagens do sistema de proteção catódica por corrente impressa e do sistema de proteção catódica galvânica, apontando as situações em que cada um desses métodos se aplicam;
- dimensionar um sistema de proteção catódica galvânica,
- mostrar a eficiência do sistema dimensionado por meio de um experimento;

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Vários são os fatores que levam ao problema da corrosão no aço e, mesmo assim, a discussão deste assunto ao longo da graduação foi insignificante, limitando-se apenas a tratamentos superficiais. Nesse sentido, o presente trabalho visa a uma solução pouco conhecida no tratamento e na prevenção da corrosão, ou seja, à proteção catódica galvânica e à proteção catódica por corrente impressa. Apresentando a metodologia de aplicação e apontando os casos em que esses tipos de proteções são mais indicadas.

1.4 MÉTODO DA PESQUISA

A pesquisa bibliográfica é de suma importância para a compreensão do fenômeno estudado e a experimentação, proposta neste método de pesquisa, objetiva avaliar o processo da proteção catódica.

Nos ensaios de corrosão em laboratório, necessários para o levantamento de dados, definiu-se a composição dos corpos de prova. O processo de corrosão será acelerado opor intermédio da alteração química do meio eletrólito, a fim de obter resultados mais rápidos.

Gentil (1982) afirma que os ensaios de laboratórios são úteis para

- estudar o mecanismo de corrosão;
- indicar material mais adequado para um determinado meio;
- controle na fabricação de material resistente;
- determinar se o sistema de proteção é adequado.

Nesta pesquisa, os corpos de prova, com e sem a proteção catódica, serão submetidos as mesmas condições de agressividade por um determinado período de tempo, a fim de produzir os dados necessários à corroboração ou não da proposta.

A avaliação do processo de corrosão do aço pode ser feita seguindo os passos:

- observação visual, para verificar se a corrosão ocorreu de forma homogênea ou por pite;
- perda de massa, por meio de uma raspagem na armadura será possível verificar a quantidade de ferrugem formada, não perdida ao meio, durante o ensaio.
- observação na armadura para verificar a profundidade e o tamanho da corrosão ocorrida no aço;
- avaliação eletroquímica: diferença de potencial entre os materiais, utilizando tabelas práticas, como apresentada na tabela 2.
- comparação dos resultados da corrosão da armadura com e sem proteção catódica.

1.5 ESTRUTURA GERAL DO TRABALHO

Este trabalho ficou definido em quatro capítulos, conforme detalhamento a seguir:

No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução do trabalho, a justificativa ao tema escolhido e as considerações gerais. Ainda nesta parte encontra-se o método de pesquisa que será utilizado para a obtenção dos resultados experimentais.

Segue, no segundo capítulo, uma pequena exposição quanto à química da corrosão e à formação de pilhas eletroquímica, conceito fundamental para um melhor entendimento do processo de corrosão. Em seguida, aborda-se o potencial de alguns elementos, primordiais para o entendimento prático do processo de corrosão.

Exibem-se, no terceiro capítulo, os principais tipos de corrosão e as propriedades que pode acometer o aço.

Já na quarta parte, tratamos a história do sistema de prevenção a corrosão do aço, campo de aplicação dessas técnicas, além do mecanismo básico de proteção catódica galvânica e a proteção catódica por corrente impressa.

Finalmente, os dados obtidos mediante experiência, utilizando corpos de prova e as referências de autores utilizados para compor a fundamentação teórica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO ARMADO

A utilização do concreto armado no Brasil surgiu, segundo a revista Téchne, no ano de 1904 no Rio de Janeiro. Desde o início de sua utilização até os dias atuais, o concreto passou por grande evolução na qualidade do agregado, no melhoramento do cimento portland e do aço utilizado.

Este tipo de concreto é empregado em grande parte das obras brasileiras e recebe esse nome por possui reforço de uma armadura de aço, formando um elemento muito resistente à compressão e à tração devido a combinação destes materiais. No concreto, a atuação do aço ocorre após a fissuração do concreto, algo inevitável, pois o controle nos limites máximos de fissuração deve ser respeitado segundo a NBR6118/20014. Por outro lado, após a ocorrência desse processo, a armadura de aço fica mais suscetível à ação de agentes externos, podendo causar a corrosão.

Problemas na execução de estruturas de concreto armado também são comuns, pode-se citar, por exemplo, a falha no processo de execução que provoca a diminuição ou a ausência da camada de cobrimento. Uma vez que o mínimo previsto em norma não é observado, o cobrimento necessário para a proteção da armadura fica comprometido, permitindo a exposição ao meio ambiente e facilitando o processo de corrosão.

Ainda que a corrosão seja um processo natural, medidas podem ser tomadas visando à proteção de estruturas de aço, seja no concreto armado, no concreto protendido ou nas estruturas metálicas. Corroborando a importância da proteção das estruturas, a Associação Brasileira de Corrosão, estima que no Brasil o processo de recuperação de estruturas com corrosão custe 3% do PIB e que adotando técnicas de prevenção pode-se economizar 2% do PIB.

2.2 CORROSÃO

Segundo Jones (1996), a corrosão é um resultado destrutivo da reação química ou eletroquímica entre o metal ou a liga metálica e seu ambiente. Para Furtado (1981), ela atua geralmente sobre a superfície do metal e logo estabelece uma relação entre o agente corrosivo e o meio em que o metal se encontra, que pode apresentar um papel fundamental no processo

de corrosão. Esta reação consome o metal, podendo causar destruição, seja pela perda de suas dimensões ou pela mudança de sua estrutura química.

Assinala ainda que a maioria dos metais existe sob forma combinada como óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfetos, sulfatos e silicatos etc. A extração de um metal de seus minérios requer uma quantidade de energia considerável, por isso se considera um metal isolado como estando em um estado energético muito mais elevado do que no mineral correspondente, portanto como o metal tende a retornar ao seu estado de mais baixa energia (estado combinado) reage com o meio ambiente, sofrendo a corrosão. Pode-se concluir que, por ser um processo de degradação, a corrosão é caracterizada pela dissipação de energia.

Convém ressaltar que o processo de corrosão pode, em alguns casos ser admitido como o processo inverso do processo metalúrgico - extração do metal a partir de seus minérios - sendo o produto da corrosão semelhante ao minério do qual é originalmente extraído.

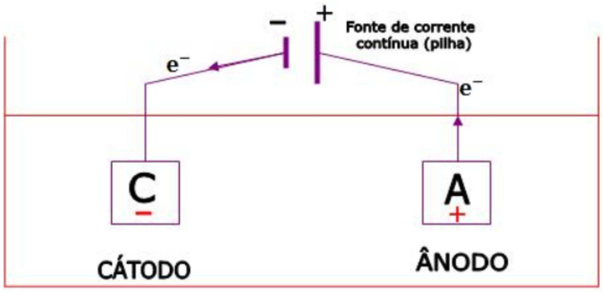
Se o processo de corrosão é um processo natural e espontâneo, logo para aumentar a vida útil de estruturas de aço, deve-se executar a proteção da peça, podendo se valer do processo de proteção catódica.

2.2.1 Mecanismo eletroquímico e eletrolítico da corrosão

A corrosão é um processo de oxirredução cujo fenômeno acontece simultaneamente, ou seja, sempre que ocorre a oxidação (perda de elétrons) ocorre a redução (ganho de elétrons).

Na figura 1, há uma representação esquemática de uma célula eletroquímica, em que o sentido da corrente mostrado é o sentido real.

Figura 1 - Esquema célula eletroquímica



Fonte: CESAR, Paulo. Portal de Estudos em Química, 2018

Esquematicamente uma pilha eletroquímica apresenta os seguintes componentes:

- Ânodo - eletrodo onde ocorre a oxidação e consequentemente a corrosão e onde a corrente elétrica, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito.
- Cátodo - eletrodo onde os elétrons "*entram*" na solução, provocando redução.
- Eletrólito - condutor, usualmente líquido, que contém íons que transportam a corrente do anodo para o catodo (sentido convencional da corrente) ou do catodo para o anodo(sentido real da corrente).

No circuito estabelecido na figura 1, há a perda de elétrons pelo ânodo, que sofre oxidação e o ganho de elétrons pelo cátodo, o qual sofre redução. Nesse caso, pode-se perceber que a fonte externa é responsável por gerar uma diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo, provocando reações de oxirredução. O mesmo processo pode ocorrer de maneira espontânea quando os materiais possuem potenciais diferentes.

A pilha eletroquímica é caracterizada por uma diferença de potencial entre os seus eletrodos e com o circuito aberto a diferença de potencial entre os eletrodos é definida como sendo a força eletromotriz. Segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada - IUPAC – tem-se

$$E_{pilha} = E_{catodo} - E_{anodo}$$

em que,

E catodo e E anodo representam o potencial de redução de cada eletrodo.

Podemos esquematizar o processo eletroquímico, conforme o processo abaixo:

- Para processos espontâneos:

$A + B \rightarrow A^{n+} B^{n-}$

$A \rightarrow A^{n+} + ne$

$B + ne \rightarrow B^{n-}$

- Para processos não espontâneos, ou seja, com a utilização de uma fonte externa para gerar a diferença de potencial entre o ânodo e o catodo:

$$A^{n+}B^{n-} \xrightarrow[\text{elétrica}]{\text{corrente}} A + B$$

$$A^{n+} + ne \rightarrow A$$

$$B^{n-} \rightarrow B + ne$$

Gentil (1982) exemplifica as reações acima com o cloreto de sódio, cuja formação é um processo espontâneo:

$$Na + 1/2Cl_2 \rightarrow Na^{+}Cl^{-}$$

$$Na \rightarrow Na^{+} + 1e$$

$$1/2Cl_2 + 1e \rightarrow Cl^{-}$$

o mesmo processo, porém no caso não espontâneo temos:

$$NaCl \xrightarrow[\text{elétrica}]{\text{corrente}} + 1/2Cl_2$$

$$Na^{+} + 1e \rightarrow Na$$

$$Cl^{-} \rightarrow 1/2\ Cl_2 + 1e$$

A pilha eletroquímica tem grande importância no entendimento quanto ao processo de corrosão, uma vez que ao fornecer elétrons o anodo irá oxidar.

Considerando que a pilha, representada na figura 1, possui eletrodos de ferro imersos em uma solução com cloreto de sódio - meio eletrolítico – apresentam-se as seguintes reações:

- Anodo:

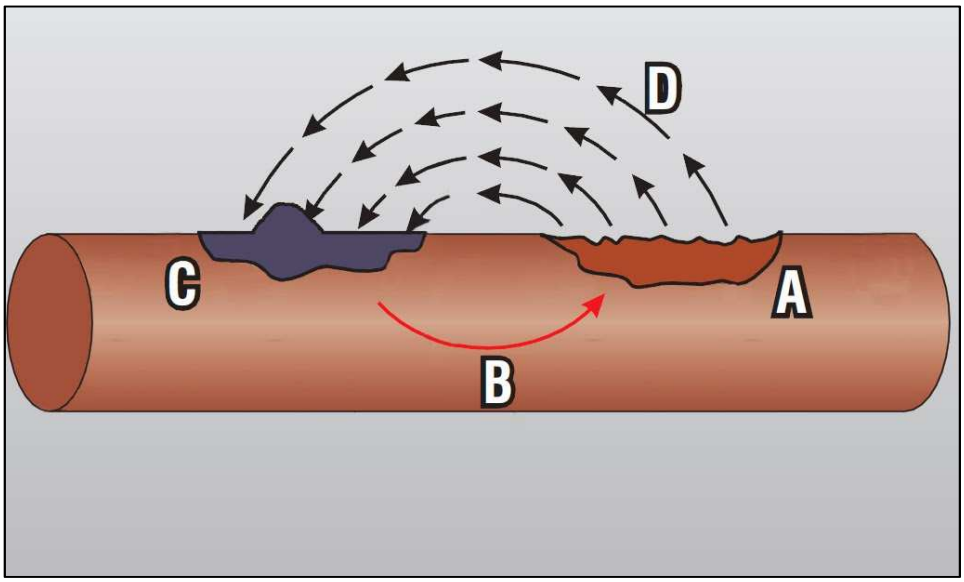
$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$$

- Catodo:

$$2H_2O + 2e \rightarrow H_2 + 2OH^{-}$$

Percebe-se que, pelo processo descrito, quando houver a formação de uma pilha eletroquímica ou eletrolítica, a corrosão do ânodo ocorrerá em estruturas de concreto armado, devemos evitar a formação de região anódica ou catódica, como mostra a figura 2.

Figura 2 - Esquema de formação de região anodo e catodo em barra de aço



Fonte: http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2013/11/protecao-catodica.html (2018)

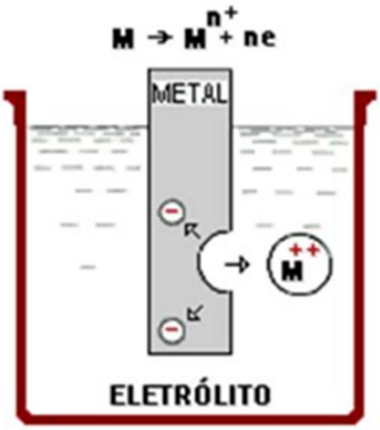
A partir da Figura 2, entende-se que a formação de uma pilha eletroquímica, processo espontâneo, em que surge o aparecimento de uma corrente elétrica na região B, do catodo(C) para o anodo (A), o solo (D) serve como meio eletrólito, conduzindo íons do anodo para o catodo, ocorrendo a oxidação na região do anodo. Portanto, para impedir o problema de corrosão deve-se evitar a formação de região anódica e catódica.

2.2.2 Potencial de eletrodo ou potencial eletroquímico

O potencial de eletrodo dos materiais é de suma importância na avaliação da reação oxirredução em uma pilha eletroquímica. O potencial de eletrodo surge quando se tem um metal em contato com um meio eletrólito. Nesse caso, pode haver um potencial positivo, negativo ou neutro. Isso ocorre quando o metal entra em contato com uma solução aquosa de seus íons, conforme Figura 3, estabelecendo um sistema de natureza elétrica e química, conforme descrito na equação abaixo:

$$M_{sólido} \leftrightarrow M^{n+}_{aquoso} + ne$$

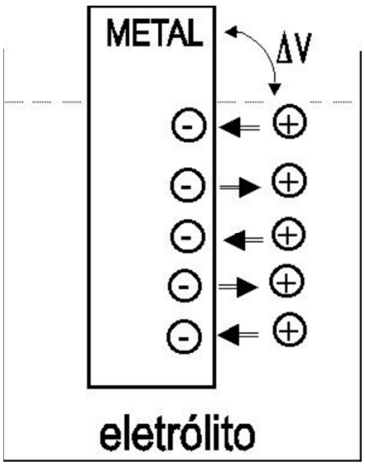
Figura 3 - Reação anódica



Fonte: Quintal, Valentina.Método de combate a corrosão,2018

A reação tende a seguir o sentido mostrado na Figura 2, até atingir a saturação do eletrólito, quando um íon do metal deixa a superfície deste. Segundo a equação anterior, um número equivalente de elétrons deve se acumular na superfície do metal (tornando-se negativo), mantendo o sistema em equilíbrio. Como no metal e no meio eletrólito, há cargas de sinais opostos, figura 4, além do surgimento de um campo eletrostático que gera uma diferença de potencial, que depende de fatores relacionados com o metal e com o meio eletrólito, tais como: concentração, temperatura, aeração e grau de agitação.

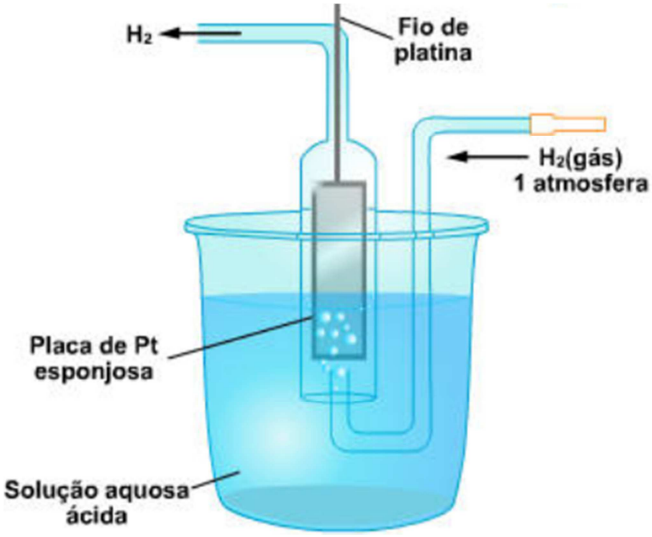
Figura 4 - Equilíbrio entre o metal e o eletrólito



Fonte:Dutra, A; Silva, J. Princípios da corrosão, 2018.

Devido a dificuldade de se medir a diferença de potencial entre o eletrodo e a solução (impraticável experimentalmente), foi desenvolvimento um método que utiliza um eletrodo de referência ou eletrodo normal de hidrogênio, conforme mostra a figura 5.

Figura 5 - Eletrodo de hidrogênio



Fonte: CESAR, Paulo. Portal de Estudos em Química, 2018

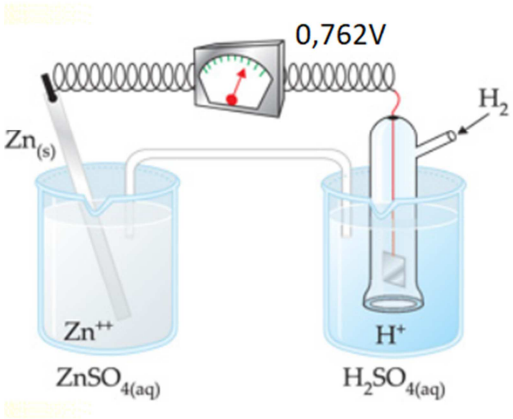
No eletrodo de hidrogênio, o meio eletrólito é uma solução de íons de hidrogênio (atividade igual a 1), em que o hidrogênio é injetado, formando bolhas sobre o eletrodo de platina. Esse é recoberto por platina finalmente pulverizada, que absorve o hidrogênio molecular. Nessa situação sobre a placa de platina fica uma película de hidrogênio, resultando em um sistema onde há uma placa de hidrogênio em uma solução com íons de hidrogênio, nessas condições o sistema entra em equilíbrio, com a equação:

$$H_2 \leftrightarrow 2H^+ + 2e$$

A este potencial, convencionou-se o valor zero para qualquer temperatura. Elaborando uma pilha que por um lado ocorre o eletrodo de hidrogênio e por outro, o eletrodo de outro metal, imerso em solução de íons. Assim, pode-se medir o potencial da pilha.

Ao medir a diferença de potencial entre o eletrodo de hidrogênio e um eletrodo de zinco, imersos em um meio com íons deste metal, conforme mostra a figura 6, tem-se o registro de 0,762V.

Figura 6 - Eletrodo de Zinco e eletrodo de Hidrogênio ligados por ponte salina.



Fonte: CESAR, Paulo. Portal de Estudos em Química, 2018

Com o sistema em funcionamento como mostra a Figura 6, nota-se que no eletrodo de Zn ocorre a corrosão (anodo), conforme equação abaixo:

$$Zn \leftrightarrow Zn^{+\,+} + 2e$$

De acordo com a IUPAC:

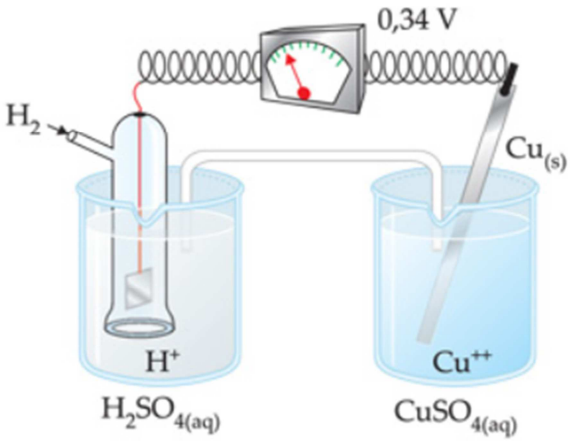
$$E_{pilha} = E_{catodo} - E_{\ anodo}$$

$$0,762 = 0 - E_{\ anodo}$$

$$E_{\hat{a}nodo\ (Zn)} = -0{,}762V$$

Realizando o mesmo processo, com um dos eletrodos sendo de Cobre, como mostra a Figura 7, em que se observa a deposição de metal sobre a placa (catodo).

Figura 7 - Eletrodo de Cobre e eletrodo de Hidrogênio ligados por ponte salina



Fonte: CESAR, Paulo. Portal de Estudos em Química, 2018

Aplicando a convenção da IUPAC, temos:

$$E_{pilha} = E_{catodo} - E_{anodo}$$

$$0,34 = E_{catodo} - 0$$

$$E_{cátodo\ (Cu)} = 0,34V$$

O sinal do potencial indica o sentido do movimento dos elétrons, sendo o sinal de negativo quando os elétrons se deslocam do metal para o eletrodo de hidrogênio e o sinal positivo para o movimento oposto.

De acordo com experimentos realizados anteriormente, para diversos metais e para a convenção de sinal adotado pela IUPAC, elaborou-se a série de potencial elétrico, segundo a Tabela 1.

Tabela 1 - Série eletromotriz - potencial padrão de alguns metais

ORDEM CRESCENTE DE AÇÃO OXIDANTE

Potencial de redução (E^0_{red})	Estado reduzido		Estado oxidado	Potencial de oxidação (E^0_{oxid})
– 3,04	Li	⇄	$Li^+ + e^-$	+ 3,04
– 2,92	K	⇄	$K^+ + e^-$	+ 2,92
– 2,90	Ba	⇄	$Ba^{2+} + 2e^-$	+ 2,90
– 2,89	Sr	⇄	$Sr^{2+} + 2e^-$	+ 2,89
– 2,87	Ca	⇄	$Ca^{2+} + 2e^-$	+ 2,87
– 2,71	Na	⇄	$Na^+ + e^-$	+ 2,71
– 2,37	Mg	⇄	$Mg^{2+} + 2e^-$	+ 2,37
– 1,66	Al	⇄	$Al^{3+} + 3e^-$	+ 1,66
– 1,18	Mn	⇄	$Mn^{2+} + 2e^-$	+ 1,18
– 0,83	$H_2 + 2(OH)^-$	⇄	$2\,H_2O + 2e^-$	+ 0,83
– 0,76	Zn	⇄	$Zn^{2+} + 2e^-$	+ 0,76
– 0,74	Cr	⇄	$Cr^{3+} + 3e^-$	+ 0,74
– 0,48	S^{2-}	⇄	$S + 2e^-$	+ 0,48
– 0,44	Fe	⇄	$Fe^{2+} + 2e^-$	+ 0,44
– 0,28	Co	⇄	$Co^{2+} + 2e^-$	+ 0,28
– 0,23	Ni	⇄	$Ni^{2+} + 2e^-$	+ 0,23
– 0,13	Pb	⇄	$Pb^{2+} + 2e^-$	+ 0,13
0,00	H_2	⇄	$2H^+ + 2e^-$	0,00
+ 0,15	Cu^+	⇄	$Cu^{2+} + e^-$	– 0,15
+ 0,34	Cu	⇄	$Cu^{2+} + 2e^-$	– 0,34
+ 0,40	$2\,(OH)^-$	⇄	$H_2O + 1/2\,O_2 + 2e^-$	– 0,40
+ 0,52	Cu	⇄	$Cu^+ + e^-$	– 0,52
+ 0,54	$2I^-$	⇄	$I_2 + 2e^-$	– 0,54
+ 0,77	Fe^{2+}	⇄	$Fe^{3+} + e^-$	– 0,77
+ 0,80	Ag	⇄	$Ag^+ + e^-$	– 0,80
+ 0,85	Hg	⇄	$Hg^{2+} + 2e^-$	– 0,85
+ 1,09	$2\,Br^-$	⇄	$Br_2 + 2e^-$	– 1,09
+ 1,23	H_2O	⇄	$2H^+ + 1/2\,O_2 + 2e^-$	– 1,23
+ 1,36	$2\,Cl^-$	⇄	$Cl_2 + 2e^-$	– 1,36
+ 2,87	$2\,F^-$	⇄	$F_2 + 2e^-$	– 2,87

ORDEM CRESCENTE DE AÇÃO REDUTORA

Fonte: CESAR, Paulo. Portal de Estudos em Química, 2018

Verificou-se, na Tabela 1, que um grande valor negativo de potencial remete à tendência a perder elétrons, formando íons positivos, oxidando-se facilmente.

Como normalmente na natureza não ocorrem condições padrão, tendo em vista a infinidade de íons e uma infinidade de meios, usa-se na prática a série galvânica para cada meio considerado, sendo a mais conhecida a série galvânica relativa à água do mar, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Série Galvânica em água do mar

Extremidade anódica (menos nobre)	
1- Magnésio e suas ligas	**2**- Zinco
3- Alumínio comercialmente puro (1100)	**4**- Cádmio
5- Liga de Al (4,5Cu; 1,6Mg; 0,6Mn)	**6**- Aço Carbono
7-Fe Fundido	**8**- Aço Inox (13Cr ativo)
9- Ni- Resist. (Fe fundido com alto Ni)	**10**- Aço Inox (ativo) AISI 304 (18-8 Cr-Ni)
11- Aço Inox (ativo) AISI 3164 (18-10-8 Cr-Ni-Mo)	**12**- Liga de Pb e Estanho (Solda)
13- Chumbo	**14**- Estanho
15- Níquel (ativo)	**16**- Inconel (ativo)
17-Latões (Cu-Zn)	**18**- Cobre
19- Bronze (CU-Sn)	**20**- Cupro Ni (60-90 Ni, 40-10Ni)
21-Monel (70Ni 30Cu)	**22**- Solda Prata
23- Ni (passivo)	**24**- Inconel (passivo)
25-Aço Inox ao Cr (11-13 Cr passivo)	**26**-Aço Inox AISI-304 (passivo)
27-Aço Inox AISI-316 (passivo)	**28**- Prata
29-Titânio	**30**-Grafite
31-Ouro	**32**-Platina
	Extremidade catódica (mais nobre)

Fonte: http://slideplayer.com.br/slide/361380 (2018)

A utilização da tabela é de fácil interpretação, por exemplo, ligando eletricamente dois materiais que se localizam na Tabela 2, imersos em água do mar, o material que se situa em uma posição menor se comporta como anodo (oxida) e o material que se encontra em uma posição numérica maior atua como catodo. Quanto maior for a diferença entre a posição numérica entre os materiais, maior será a corrosão do material anódico.

Percebe-se, então, que ligando eletricamente o Chumbo e a Prata em água do mar, o chumbo sofrerá mais corrosão do que se ligado eletricamente, nas mesmas condições, com o cobre.

2.2.3 Tipos de corrosão

Os tipos de corrosão de natureza eletroquímica recebem designações diferentes, conforme as condições particulares que se processam com a natureza do meio corrosivo, com o tipo dos metais e até mesmo com o aspecto da corrosão. Apresentam-se, a seguir, alguns dos principais tipos de corrosão.

2.2.3.1 Corrosão galvânica

A corrosão galvânica é um processo eletroquímico em que um metal sofre corrosão preferencialmente em relação a outro quando os dois metais estão em contato elétrico e imersos em um meio eletrolítico. Este tipo de corrosão será tão mais intenso quanto mais distantes forem os materiais, na tabela 1, de potenciais eletroquímicos no eletrólito considerado. Isso porque, quanto maior a distância dos materiais nesta tabela, maior a diferença de potencial entre eles e consequentemente maior a corrente elétrica no processo.

2.2.3.2 Corrosão em frestas

Nas frestas, os metais estão sujeitos à corrosão pelo fato de ali existir uma concentração de oxigênio menor que nas regiões vizinhas (aeração diferencial). Não menos importante, a concentração diferencial provoca igualmente ação corrosiva, mediante a variação de determinados componentes no qual o material está permanentemente ou mesmo eventualmente imerso (em contato).

2.2.3.3 Corrosão atmosférica

Designa-se, genericamente, de corrosão atmosférica aos processos corrosivos em estruturas aéreas. A intensidade de corrosão atmosférica depende basicamente da umidade relativa do ar, do teor de sais em suspensão e do teor de gases poluentes, especialmente os gases de enxofre.

Outros fatores que influenciam a corrosividade de uma atmosfera são

- o regime de chuvas: associado à lavagem dos poluentes que a chuva proporciona;

● as partículas sólidas em suspensão: podem depositar-se nas superfícies metálicas, proporcionando o aparecimento de pilhas de aeração diferencial, além de contribuir para a retenção de umidade no local;

● o regime dos ventos: contribuem para dispersar poluentes ou lançá-los sobre as estruturas metálicas. A ação dos ventos também pode provocar erosão sobre os revestimentos protetores e, até mesmo, sobre os materiais metálicos;

● a temperatura: se for elevada, diminui a possibilidade de condensação de vapor de água na superfície metálica e a adsorção de gases, minimizando a possibilidade de corrosão;

● o tempo de permanência do eletrólito: quanto menor o tempo de permanência do eletrólito, menores serão os processos corrosivos.

2.2.3.4 Corrosão pelo solo

A corrosão pelo solo é um processo corrosivo observado em estruturas enterradas. Estas estruturas são, normalmente, tubulações, estacas metálicas, cabos de transmissão de energia e de telecomunicações, tanques enterrados e outros.

Segundo Dutra e Nunes (2011), a intensidade da corrosão pelo solo depende do teor de umidade, da composição química e do pH do próprio solo. Na prática de corrosão, utiliza-se comumente o valor da resistividade elétrica do solo como índice de sua agressividade. Um solo de resistividade baixa é mais agressivo, uma vez que possui umidade permanente e sais minerais dissolvidos; enquanto um solo de resistividade elevada é menos agressivo e possui menos umidade e sais minerais dissolvidos. Outros fatores que podem influenciar a corrosividade do solo são

● a permeabilidade do solo: os solos mais permeáveis permitem maior aeração da estrutura e, consequentemente, maiores taxas de corrosão;

● a presença de bactérias: certos tipos de bactérias podem acelerar os processos corrosivos, em condições particulares;

● a presença de poluentes: os poluente, de modo geral, podem tornar o solo mais agressivo.

2.2.3.5 Corrosão pela água

Designa-se corrosão pela água os processos observados em estruturas em contato com o meio aquoso. As estruturas sujeitas a esta corrosão são as estacas de piers, as tubulações submersas, a instalação de água de refrigeração, a instalação de geração de vapor e instalações de tratamento e distribuição de água (DUTRA; NUNES, 2011).

Para as estruturas submersas em água doce, as taxas de corrosão dependem das concentrações de sais, ácido ou bases dissolvidas, visto que a presença destas substâncias acelera o processo corrosivo.

Tendo em vista que a estrutura submersa em água salgada sempre estará sujeita à grande taxa de corrosão, particularmente em meios aerados, os quais podem ser ainda agravados pela presença de poluentes. A água do mar em virtude da presença acentuada de sais é um eletrólito por excelência bem como outros constituintes como gases dissolvidos podem acelerar os processos corrosivos. Tanto para as estruturas imersas em águas doces, como salgadas; as taxas de corrosão poderão ser diminuídas ou aumentadas de acordo com o teor de oxigênio dissolvido. Mesmo na presença de água salgada, uma estrutura de aço terá taxas de corrosão desprezível se o teor de oxigênio dissolvido for praticamente nulo.

2.2.3.6 Corrosão em concreto

A armadura de aço presente no concreto armado não é suscetível a corrosão, exceto quando ocorre contaminação e deterioração do concreto. A camada de cobrimento de cimento e seus componentes atuam de modo a inibir a corrosão da armadura e serve como barreira mecânica para entrada de contaminantes.

A partir do exposto, pode-se concluir que quanto melhor for a qualidade do cobrimento, que impede a entrada de ar e oxigênio, fundamentais no processo corrosivo, maior será a proteção mecânica.

Outro fator que inibe a corrosão do aço no concreto é a alcalinidade do mesmo, devido ao hidróxido de Cálcio, formado durante hidratação do cimento mantendo o meio básico (com pH em torno de 12), que favorece a passivação do aço.

Em boa parte dos casos o aço presente no concreto armado ou protendido, passam por um longo tempo resistente aos agentes corrosivos, porém em alguns casos o processo de corrosão pode ocorrer de maneira progressiva e com velocidade elevada.

Sobre o processo de corrosão da armadura no concreto, Gentil (1982, p. 86) cita três formas:

> 1. **Corrosão sob tensão fraturante**: na presença de um meio corrosivo o aço, sob ação mecânica, pode apresentar fratura frágil, que pode ser transmitido inter ou intragranularmente, fazendo com que o aço perca sua função estrutural.
> 2. **Corrosão por hidrogênio atômico:** quando o hidrogênio é difundido pelo interior do aço esse perde ductilidade podendo ocorrer fratura.
> 3. **Corrosão por pite**: desgaste localizado na superfície da armadura, agindo, então, como regiões de concentração de tensão, podendo iniciar o processo de corrosão fraturante.

A corrosão pode produzir fratura no aço interferindo na utilização e na estabilidade da estrutura. Assim, para se evitar o processo de corrosão do aço deve-se impedir a formação de pilhas eletroquímicas. Para isso deve-se dar atenção especial ao concreto, evitando que esse meio sirva para formação dessas pilhas.

Fraturas ou falhas na capa de cobrimento do concreto pode gerar uma aeração diferencial no fundo dessa falha, tendo em vista que em áreas menos aeradas surge a oxidação, formando $Fe2O3\ nH2O$ *o* óxido de ferro hidratado, daí advém a corrosão do aço e a deterioração do concreto, devido à expansão que ocorre como produto da corrosão, que exerce uma pressão da ordem de 1kg/cm² , fraturando o concreto.

Segundo Gentil (1982), o contato entre materiais metálicos diferentes pode criar pilhas galvânicas, o que favorece a ocorrência da corrosão localizada no ferro funcionar como ânodo da pilha formada. No caso de áreas, diferentemente deformadas ou tensionadas, Gentil (1982) afirma que, nas áreas de concentração de esforços, existe a corrosão mais acentuada, pois nesse local funciona como pequenas áreas anódicas em relação a grandes áreas catódicas e como o mecanismo é eletroquímico tem-se alta densidade de corrente, acelerando o processo corrosivo.

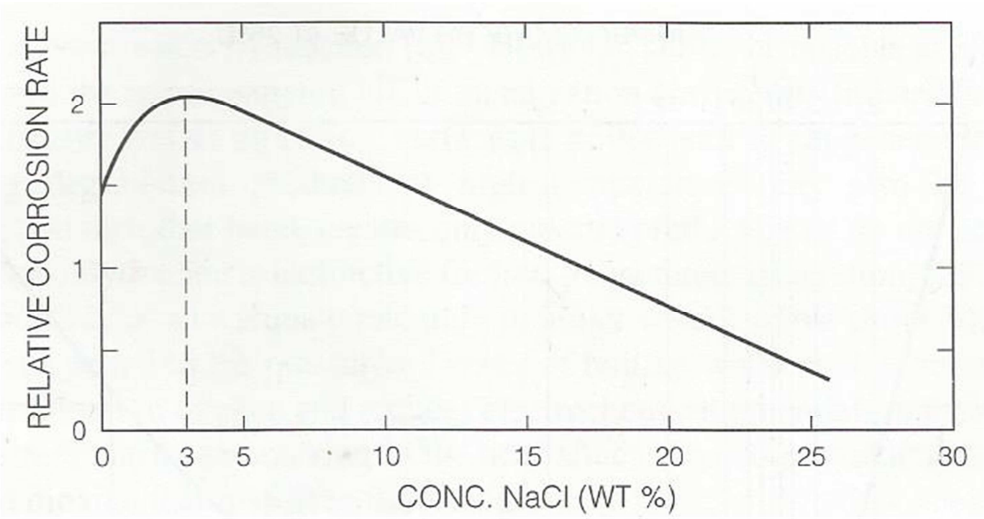
A corrosão descrita nos processos anteriores é um processo espontâneo, ou seja, a corrente é originada na pilha eletroquímica devido a heterogeneidade existente no próprio material ou meio corrosivo. Alguns fatores externos, segundo Gentil (1982), podem acelerar o processo de corrosão, neste caso, ressaltam-se a

1. **Porosidade e permeabilidade** - a porosidade do concreto pode deixá-lo mais exposto a penetração de soluções de eletrólito e gases, como o oxigênio, o que reduz a resistividade do concreto e favorece a formação de pilha eletroquímica, acelerando o processo de corrosão.

2. **Condutividade** - Sais como cloretos, sulfatos e nitratos são eletrólitos fortes que reduzem a resistividade do meio e favorecem o fluxo de elétrons, característica de um processo eletroquímico de corrosão, o que favorece a formação de corrosão por pite. Sendo assim, é importante ter controle sobre a quantidade de cloreto adicionada ao concreto e evitar a utilização de aditivos a base destes.

3. **Água do mar** - a água do mar apresenta um meio bastante agressivo para o concreto, pois ela pode sofrer ataque químico dos sais dissolvidos, o maior exemplo é o cloreto de sódio. Este elemento aumenta a condutividade intensificando a corrente entre o anodo e o catodo. Segundo Jones (1996), a taxa de corrosão da armadura é máxima para a concentração de 3% de cloreto de sódio. Conforme Figura 8, Jones (1996) explica que aumentando a concentração de sal diminui a solubilidade do oxigênio dissolvido.

Figura 8 - Taxa de corrosão do aço em função da concentração de NaCl.



Fonte: JONES (1996 p. 366)

2.3 PROTEÇÃO CATÓDICA

A história recente da proteção catódica, importante método de combate à corrosão, deixa claro que este tipo de proteção ainda tem muito a crescer. O entendimento do mecanismo básico de funcionamento, tanto da proteção catódica galvânica quanto da proteção catódica por corrente impressa, faz parte deste capítulo.

2.3.1 História

A história da proteção catódica data dos primórdios do século XIX, quando a eletroquímica dava também os seus primeiros passos, principalmente na Inglaterra, onde os anais da Real Sociedade guardam, ainda, as comunicações dos cientistas da época. Foi experimentada pela primeira vez pelo Sir Humphrey Davy, para retardar a corrosão das chapas de cobre que revestiam os cascos de madeira dos navios, mediante a fixação, naquelas estruturas, de pequenos pedaços de outros materiais como o ferro, o estanho e o zinco (GOMES, 1990)

Após um grande período praticamente sem notícias sobre o desenvolvimento técnico de sistemas de proteção anticorrosão, surge na década de 20, com o desenvolvimento da indústria do petróleo, os longos oleodutos e gasodutos de aço utilizados para o transporte desses produtos. Com o agravante de estarem enterrados, pouco tempo depois, os problemas de corrosão já eram grandes e o número de furos nesses dutos aumentava. O problema foi minimizado com a aplicação de revestimentos e logo em seguida com a proteção catódica, inicialmente com anodos galvânicos e depois desenvolvendo os sistemas de corrente impressa (DUTRA; NUNES, 2011).

No Brasil, o início efetivo de sua utilização se deu por volta de 1964, com a construção do Oleoduto Rio - Belo Horizonte (ORBEL), da Petrobras. Mais recentemente, graças a aplicação eficiente das técnicas de proteção catódica, as companhias de águas, de mineração, de energia elétrica, de distribuição de gás, petróleo e derivados, as petroquímicas e as indústrias, de um modo geral encontram mais facilidade para resolver os problemas de corrosão causados pelo solo, pela água ou por corrente de fuga, que aparecem com frequência em suas instalações metálicas subterrâneas ou submersas (GOMES, 1990).

Mais recentemente, também as armaduras de aço das obras de concreto armado estão sendo protegidas catodicamente, sendo o tema abordado neste trabalho.

2.3.2 Campo de aplicação

O campo de aplicação da proteção catódica é vasto e estende-se para as aplicações das mais variadas áreas profissionais existentes no mercado. Para a utilização deste importante processo de anticorrosivo, uma característica fundamental deve ser respeitada: a existência de um meio eletrolítico. É no meio eletrolítico que se instala o leito de anodo, por meio dos quais é provida a corrente necessária à proteção.

Dentre as instalações em que se aplica a proteção catódica, destacam-se:

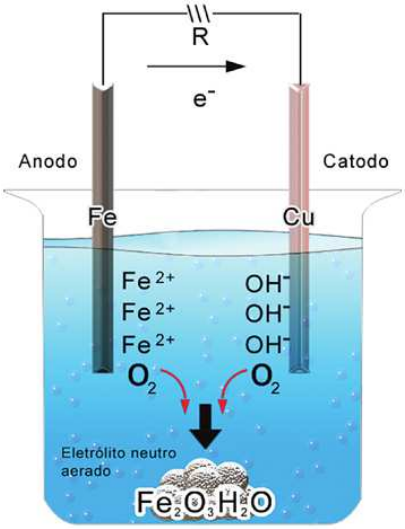
- tubulações enterradas ou submersas: adutoras, gasodutos, oleodutos, minerodutos;
- tanques de armazenamento;
- estruturas *offshore*: plataformas, tubulações, bóias e outras instalações portuárias;
- estacas metálicas de fundações;
- pontes e torres metálicas;
- estruturas enterradas de unidades industriais;
- equipamento de estações de tratamento de água e esgotos;
- tubos metálicos de encamisamento de poços artesianos e de petróleo;
- tanques de armazenamento de combustíveis em postos de abastecimento;
- armaduras metálicas de estruturas de concreto.

A proteção catódica deve ser considerada como um processo eficiente contra a corrosão da armadura do concreto armado, principalmente quando estas estruturas se encontram submersas. A água, principalmente a salgada, quando em contato com o aço do interior do concreto armado, atua como um excelente meio eletrolítico.

2.3.3 Mecanismo básico

A visualização do mecanismo da corrosão eletroquímica é necessária para o bom entendimento do mecanismo da proteção catódica. Haja vista que para ocorrer a corrosão eletroquímica é preciso uma estrutura metálica em contato com um eletrólito, na qual surgem as células de corrosão (áreas anódicas e catódicas). Tais áreas anódicas e catódicas sempre existirão, quer por motivos pertinentes ao metal ou inerentes a ele. Suas causas principais são as heterogeneidades dos materiais, tensões internas, impurezas, aeração diferencial, diferença na composição do eletrólito. Por meio do aparecimento destas áreas anódicas e catódicas, em presença de um eletrólito, surge o fluxo de corrente elétrica, necessário para a proteção do metal, como podemos visualizar na Figura 9.

Figura 9 - Pilha de corrosão galvânica



Fonte: ALVES, Flávia. InfoQuímica, 2018.

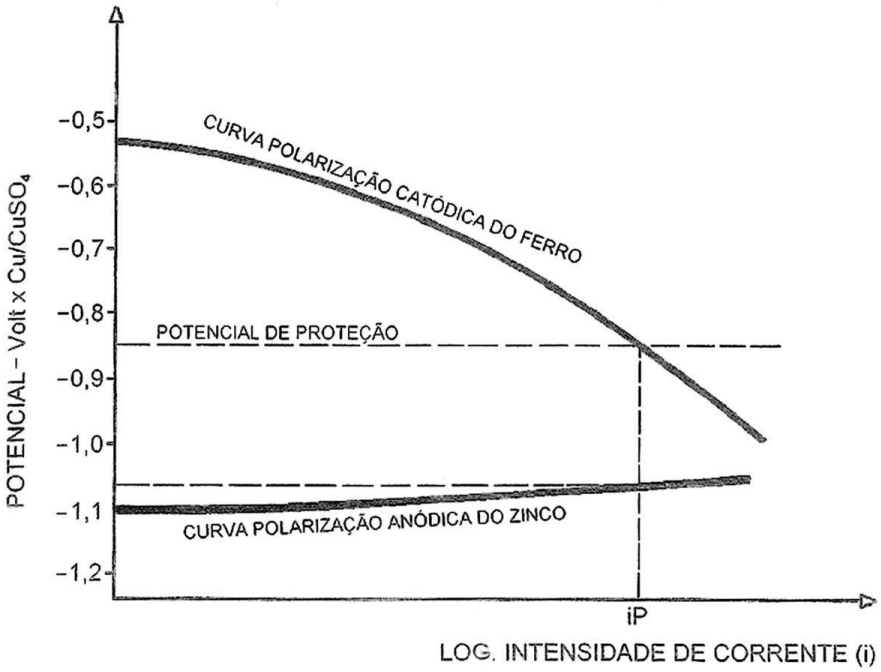
Observa-se, nesta pilha, que o cobre funciona apenas como suporte para a reação de redução permanente, sem participar dela. Enquanto os elétrons chegam à quantidade suficiente ao cobre, ele nunca será corroído. Essa é, portanto, a essência do mecanismo da proteção catódica. Importante ressaltar que o sentido da corrente elétrica, adotado na Figura 9, é o real e não o convencional.

Se, por um processo artificial, as barras de Fe e Cu da Figura 9 forem transformados em regiões catódicas, transportando-se a área anódica para outra superfície criada para este fim, o fluxo de elétrons originado da área inicialmente anódica (Cu) deixará de existir, eliminando-se, assim, o processo de corrosão.

Segundo Dutra e Nunes (2011), o mecanismo de proteção catódica é de fácil compreensão, bastando que se analise o diagrama de polarização, em que se representa a curva de polarização anódica de um anodo galvânico e a curva de polarização catódica do ferro, conforme ilustrado na Figura 10.

Então, quando um anodo galvânico é conectado com uma estrutura de aço, percebe-se a sua capacidade de liberar corrente elétrica suficiente para polarizar o aço a um valor acima do necessário para sua proteção integral. É claro que as devidas proporções entre a área do anodo e a área da estrutura a se proteger devem ser mantidas e o contato simultâneo de ambos com o meio eletrólito respeitado.

Figura 10 - Mecanismo de proteção catódica visto pelas curvas de polarização



Fonte: Dutra e Nunes (2011 p. 79)

2.3.4 Tipos de proteção

Existem dois diferentes sistemas pelos quais se pode aplicar a proteção catódica, ambos fundamentados no mesmo princípio, que é a inserção de uma corrente elétrica no material a ser protegido, por intermédio de um meio eletrolítico. Esses sistemas são conhecidos como:

- Proteção catódica galvânica
- Proteção Catódica por corrente impressa.

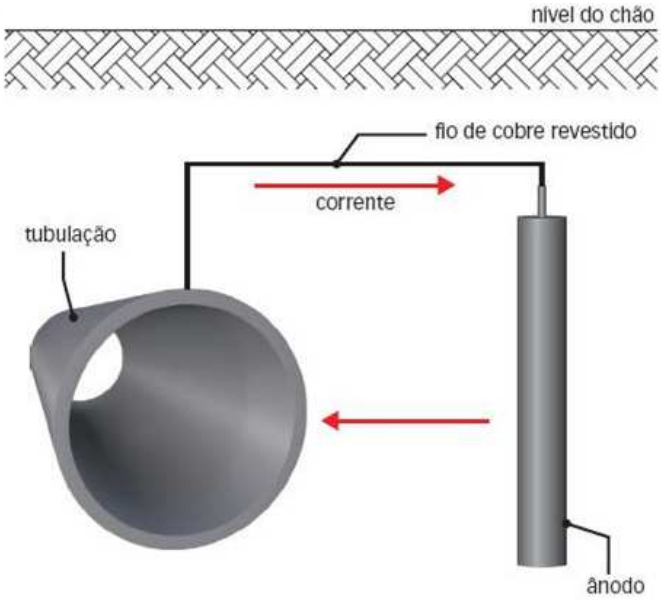
O princípio da proteção catódica de ambos se baseia em levar o potencial de corrosão do material a ser protegido para valores correspondentes à imunidade do material.

2.3.4.1 Proteção catódica galvânica

Na proteção catódica galvânica, também chamada de proteção por ânodo de sacrifício, a corrente elétrica necessária para o funcionamento do sistema é promovida pela força eletromotriz entre o metal que se deseja proteger (cátodo) e o outro metal, escolhido como anodo. É do material escolhido como ânodo que fluem os elétrons que formam a corrente elétrica do sistema, ou seja, é ele que oxida. Este processo de oxidação pode ser

interpretado como um sacrifício deste material para “salvar” outro e por isso leva o nome de anodo de sacrifício. O sentido real da corrente elétrica está indicado nas setas constantes na Figura 11.

Figura 11 - Sistema de proteção catódica galvânica



Fonte: CORSINI, Rodnei. Infraestrutura urbana, 2018.

Dentre os materiais metálicos mais empregados como anodos estão as ligas de Zinco (Zn), de Magnésio (Mg) e de Alumínio (Al), por apresentarem maior diferença de potencial em relação aos materiais metálicos mais comumente usados nas estruturas a serem protegidas, principalmente o aço, além se suas baixíssimas características de polarização anódica.

Pelo fato de as diferenças de potenciais galvânicos serem, em geral, não superiores a 1,2V; para que se tenha uma injeção de corrente capaz de proteger a estrutura, é necessário que a resistência global do circuito seja baixa. Desse fato, resulta que a proteção catódica galvânica só é eficaz em eletrólitos de baixa resistividade elétrica, como água do mar e solos até 6.000 ohm.cm, para anodos de magnésio. Para anodos de alumínio e de zinco, este limite é muito mais baixo, não devendo exceder 1.500 ohm.cm (DUTRA; NUNES, 2011).

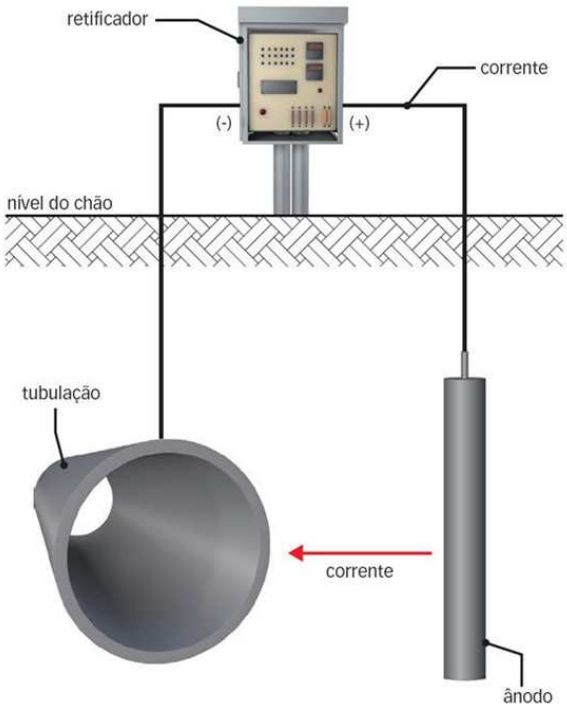
Como se pode imaginar, uma desvantagem deste sistema de proteção é a necessidade de reposição dos anodos de sacrifício após seu consumo. Por outro lado, apresenta como vantagem ser menos sujeito a interrupções no seu funcionamento, visto que não necessita de uma fonte de tensão para seu funcionamento. O sistema de proteção catódica galvânica apresenta também, como limitação, não ser apropriado para estruturas sujeitas a

fortes correntes de interferência e, praticamente, não permite uma regulagem da corrente que percorre o sistema.

2.3.4.2 Proteção catódica por corrente impressa

No sistema de proteção catódica por corrente impressa, a polarização do metal a proteger é conseguida pela aplicação de uma corrente elétrica promovida por uma força eletromotriz (f.e.m) de um gerador de corrente contínua (ex: retificador, bateria ou gerador), ilustrado na Figura 12. Para fechar o circuito, é necessário, também, a presença de um meio eletrólito e de um leito de anodo, que neste caso é inerte.

Figura 12 - Sistema de proteção catódica por corrente impressa



Fonte: CORSINI, Rodnei. Infraestrutura urbana, 2018.

A existência dessa fonte externa geradora de corrente elétrica é a grande diferença entre os dois sistemas, corrente impressa e galvânico; no galvânico a polarização ocorre espontaneamente pelo contato entre os dois metais com diferentes potenciais.

A proteção catódica por corrente impressa se aplica a estruturas situadas em eletrólitos de baixa, média, alta e altíssima resistividade. Entretanto, necessita de inspeção e manutenção especial nos retificadores, tendo em vista que as demais partes são projetadas para um período longo de duração. Outra vantagem destes sistemas é que são apropriados

para estruturas sujeitas a correntes de interferência e permitem, por meio dos retificadores, ampla regulagem. No entanto, são mais sujeitos a interrupções e a descontroles no seu funcionamento, característica própria da natureza do equipamento elétrico (DUTRA; NUNES, 2011). As fontes de corrente contínua de uso mais frequente na prática são os retificadores, os quais são alimentados em corrente alternada que, depois de retificada, é injetada nos sistemas. O leito de anodos para dispersão da corrente no eletrólito constitui-se, de um modo geral, de anodos inertes instalados numa configuração apropriada ao tipo de sistema. Na tabela 3 podemos verificar os principais tipos de anodos e seus locais de uso apropriado.

Tabela 3 - Tipos de anodos e seus locais de uso

Material do Anodo	**Uso**
Grafite	Solos, água doce e água do mar
Ferro-Silício	Solos e água doce
Ferro-Antimônio-Cromo	Solos, água doce e água do mar
Chumbo-Antimônio-Prata	Água do mar
Titânio platinizado	Água do mar
Titânio revestido	Solos, água doce e água do mar
Nióbio platinizado	Água do mar
Magnetita	Solos, água doce e água do mar

Fonte: (DUTRA; NUNES, 2011)

O grande diferencial deste sistema é o fato de que a fonte geradora poderá ter a potência desejada, bem como a fem. necessária, em função das condições de resistividade do meio eletrolítico.

No uso do sistema de proteção catódica por corrente impressa, é extremamente importante considerar que o polo negativo da fonte de corrente deva ser ligado à estrutura a proteger e o polo positivo, ao leito de anodos. Em hipótese alguma, esta polaridade deve ser invertida, sob pena de se ter uma corrosão superacelerada na estrutura, comprometendo sua integridade.

2.3.5 Corrente requerida para proteção

Neste tópico serão apresentados todos os elementos necessários para o cálculo da intensidade da corrente elétrica requerida para a proteção de uma estrutura. Considerado o fator mais importante para o dimensionamento do sistema, o cálculo para obtenção da **corrente requerida para proteção** pode ser utilizado tanto no dimensionamento do sistema de proteção catódica galvânica quanto no sistema de proteção catódica por corrente impressa.

2.3.5.1 Densidade de corrente de proteção

Um dos parâmetros mais importantes para o dimensionamento de um sistema de proteção catódica, seja ele galvânico ou corrente impressa, é a densidade de corrente de proteção [mA/m²]. Tal parâmetro deve ser entendido como a intensidade de corrente elétrica, por unidade de área a se proteger (DUTRA; NUNES, 2011). O valor da densidade de corrente de proteção a ser adotado num projeto dependerá, dentre outros fatores, da resistividade do meio (eletrólito) e do tipo do material que se deseja proteger.

O diagrama da Figura 13 tem sido empregado pelos projetistas e com boa margem de confiabilidade, uma vez que este apresenta a variação de densidade de corrente de proteção do aço, em função da resistividade elétrica do meio, observando a seguinte relação:

$$d = 13{,}35.log(10^{5{,}523}/\rho)$$

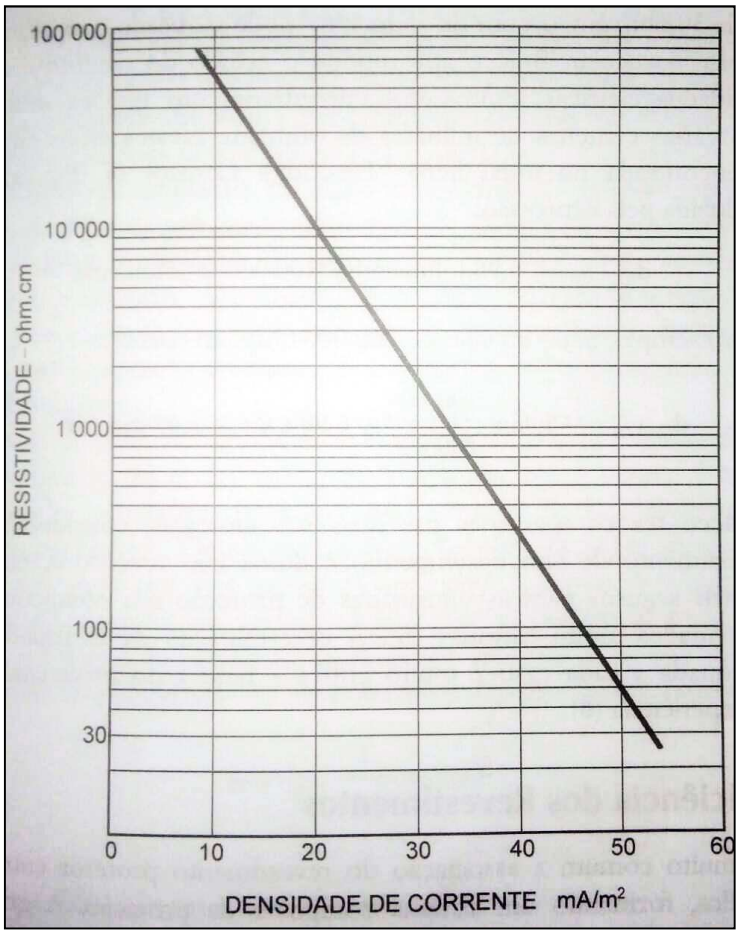
$$d = 73{,}73 - 13{,}35.log\ \rho$$

em que:

d = densidade de corrente, em mA/m²;

ρ = resistividade do meio, em ohm.cm.

Figura 13 - Variação da densidade de corrente de proteção com a resistividade do eletrólito



Fonte: (DUTRA; NUNES, 2011)

Segundo Dutra e Nunes (2011), a confiabilidade do diagrama da Figura 13 e sua equação correspondente, restringe-se aos limites do gráfico, ou seja, entre 30 ohm.cm e 80.000 ohm.cm. Acima de 100.000 ohm.cm é recomendável utilizar-se uma densidade de corrente de 10mA/m², e abaixo de 30 ohm.cm, o valor de 55 mA/m² pode ser usado com segurança. Outra limitação deste diagrama é sua aplicação a água do mar, pois se restringe à água de baixa turbulência, baixa aeração, em áreas confinadas. Em relação ao solo, poderá ser aplicado, desde que estes se encontrem nas faixas normais, isto é, não sejam muito ácidos, nem muito básicos, nem pantanosos.

2.3.5.2 Eficiência dos revestimentos

É muito comum complementar a proteção catódica com um revestimento protetor na estrutura a ser protegida, formando assim um sistema composto de proteção. A grande vantagem da combinação das duas técnicas é a redução da área exposta ao meio corrosivo. A utilização do revestimento protetor, quando possível, faz reduzir acentuadamente a intensidade da corrente requerida para a proteção, já que essa se aplicará então, apenas às falhas ocasionalmente ocorridas no revestimento.

A tubulação de aço utilizada na rede de gás natural canalizado é um exemplo de aplicação do sistema composto de proteção, pois além da proteção catódica de corrente impressa, a tubulação é protegida por um revestimento.

A eficiência dos revestimentos é calculada pela seguinte expressão:

$$E = (1 - I/Sd) \times 100$$

em que:

E = eficiência expressa em percentual;

I = intensidade da corrente empregada, em A;

S = área da superfície correspondente ao trecho protegido, em m²;

d = densidade de corrente, A/m².

2.3.5.3 Fator de velocidade

É comum a ocorrência de movimento relativo entre a estrutura a se proteger e o meio eletrólito, como por exemplo nas estruturas submersas no mar, caso em que a proteção catódica é altamente indicada.

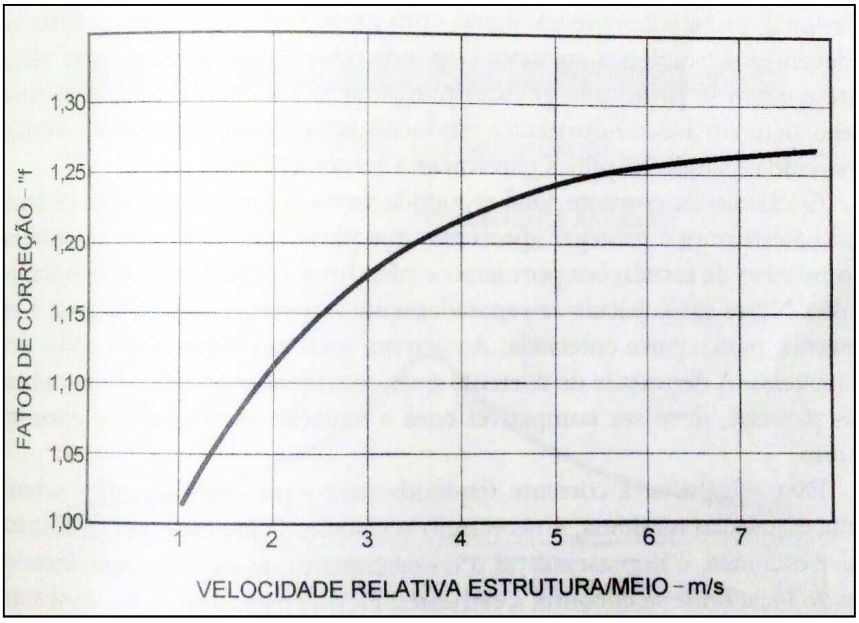
Segundo Dutra e Nunes (2011), este movimento relativo entre o metal e o eletrólito introduz uma alteração na energia cinética das reações, aumentando a velocidade por dois mecanismos principais, são eles:

a) aumento da velocidade do eletrólito aumenta a difusão dos íons formados pelas reações anódicas, baixando a concentração na vizinhança da superfície anódica, o que conduz a uma despolarização;
b) no caso de meios aerados, o aumento da velocidade do eletrólito acarreta maior suprimento de oxigênio à superfície catódica e, como o oxigênio é sabidamente

um despolarizador catódico, ele vai produzir também uma despolarização da superfície.

Estes dois fenômenos somam-se no mesmo sentido, indesejável, de modo que, para contrabalançar o seu efeito, é necessário aumentar-se a intensidade da corrente de proteção. Esse aumento é feito pela introdução de um "fator de velocidade - f", na fórmula para o cálculo da corrente requerida. O valor deste fator de velocidade é obtido a partir do diagrama da Figura 14 , em função da velocidade.

Figura 14 - Fator de correção da corrente em função do eletrólito.



Fonte: (DUTRA; NUNES, 2011)

2.3.5.4 Área a proteger

A área total da superfície a proteger é um importante elemento para o dimensionamento do sistema, visto que seu valor influencia proporcionalmente na corrente requerida para a proteção. Deve ser expressa em metros quadrados (m²), e seu valor dependerá do formato geométrico da estrutura a ser protegida.

2.3.5.5 Coeficiente de segurança

Segundo Dutra e Nunes (2011), devido à natureza e complexidade da estrutura à ser protegida, deve-se adotar um coeficiente de segurança, o qual é estipulado pelo projetista de acordo com a experiência profissional.

A faixa de variação deste coeficiente é de 1,2 a 3, onde para situações com baixa aeração e pouca movimentação do meio utilizam-se valores próximos do início da faixa e para ambientes com forte aeração e muita movimentação o final da faixa.

2.3.5.6 Cálculo da corrente requerida

O cálculo da intensidade da corrente requerida para a proteção de uma estrutura é realizado por meio do emprego da fórmula:

$$I = S \,.\, d \,.\, f \,.\, (1- E).K$$

em que

I = intensidade da corrente, em A;

S = área total da superfície a proteger, em m²;

d = densidade de corrente de proteção, em A/m²;

f = fator de velocidade, adimensional;

E = eficiência do revestimento, quando houver, expresso sob a forma decimal;

K = coeficiente de segurança.

2.3.6 Dimensionamento do sistema galvânico para estruturas marítimas

Conhecendo-se o valor da corrente requerida para proteção, dimensionar um sistema de proteção catódica galvânica consiste basicamente em selecionar o material do anodo e sua quantidade necessária.

Primeiramente deve-se definir o material do anodo, que dependerá do tipo de estrutura a proteger. Isso é, qual dos três tipos de liga a considerar: ligas de magnésio, ligas de zinco ou ligas de alumínio (DUTRA; NUNES, 2011).

Uma vez definido esses parâmetros, pode-se calcular a massa de anodos necessária a um dado sistema por meio da expressão:

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

em que

M = massa do anodo requerida, em kg;

V = vida útil desejada, em ano;

I = intensidade da corrente requerida, em ampére;

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

F = fator de utilização (adimensional).

Segundo Dutra e Nunes (2011), geralmente, adota-se para o fator de utilização o valor de 0,85, isso é, admite-se que até um percentual de 85% do anodo é consumido liberando corrente capaz de manter a estrutura protegida.

Tendo-se a massa do anodo total requerida e a massa unitária do tipo de anodo escolhido, calcula-se então o número de anodos pela expressão:

$$N = M / m$$

em que

N = número de anodos;

M = massa total requerida em kg;

m = massa total do tipo de anodo selecionado em kg.

De posse do número total de anodos, é necessário calcular a quantidade de corrente elétrica que esses N anodos liberarão. Para isso, basta multiplicar-se no número N pela corrente de cada anodo, isto é:

$$I = N \, . \, i$$

em que

I = corrente total liberada em A;

N = número de anodos;

i = corrente liderada por um anodo, no meio considerado em A.

Segundo Dutra e Nunes (2011), para atender um projeto é necessário que esta I seja maior ou igual a corrente elétrica requerida para a proteção, detalhada no item 2.3.5. Utilizando-se da fórmula anterior, pode-se chegar ao número N de anodos dividindo a corrente requerida pela corrente unitária, liberada no meio considerado, pelo tipo de anodo escolhido, ou seja:

$$N = I / i$$

em que

N = número de anodos;

I = corrente requerida em A;

i = corrente liderada por um anodo no meio considerado em A.

Desse modo, tem-se assegurada a condição básica de corrente, mas é necessário verificar se a massa destes N anodos atende à vida útil estipulada, em anos, para o projeto, ou seja, a massa dos N anodos deve ser maior ou igual à massa total requerida.

Caso não se tenha a corrente liberada pelo tipo de anodo selecionado, torna-se necessário o seu cálculo. A corrente i de um anodo é dada por:

$$i = \Delta V / R$$

em que

i = Corrente liberada em A;

ΔV = Força eletromotriz disponível em V;

R = resistência do circuito em Ohm.

Segundo Dutra e Nunes (2011), a força eletromotriz utilizada para o cálculo da corrente liberada por um anodo galvânico, corresponde à diferença entre o potencial do anodo e o potencial da estrutura polarizada ao potencial mínimo de proteção.

Conforme Dutra e Nunes (2011, p. 126):

> Para anodos de liga de zinco e de ligas de alumínio, o potencial considerado é de –1,05V em relação ao eletrodo de Ag/AgCl. Para anodos de liga de magnésio considera-se -1,50V. O potencial mínimo de proteção da estrutura de aço na água do mar é de –0,8V, em relação ao citado eletrodo. Então a força eletromotriz disponível, no primeiro caso, é de 0,25V e no segundo caso, é de 0,70V.

A resistência do circuito é outra grandeza a ser determinada e sua componente principal é representada pela resistência do contato anodo/eletrólito. As demais componentes são desprezíveis e por essa razão, não são consideradas no cálculo da corrente liberada por um anodo na água do mar.

Segundo Dutra e Nunes (2011), a resistência de contato de um anodo/ eletrólito é função da resistividade do meio e da forma do anodo. Quando o anodo tem a forma cilíndrica e está mergulhado num eletrólito, a resistência de contato é calculada pela fórmula aproximada, desenvolvida por Dwight

$$R = \rho \cdot [\, ln(8L/D) - 1] \,/\, 2\pi L$$

em que

R = resistência em ohm;

ρ = resistividade elétrica do eletrólito em ohm.cm;

L = comprimento do anodo em cm;

D = diâmetro médio efetivo do anodo em cm.

Por diâmetro médio efetivo, entende-se o diâmetro remanescente quando o anodo já tem um consumo de 40%. Caso o anodo seja alongado, mas não cilíndrico, isto é, com seção transversal quadrada, retangular ou trapezoidal, calcula-se o seu diâmetro médio efetivo pela fórmula:

$$D = 2\sqrt{\frac{0{,}6S}{\pi}}$$

em que

D = diâmetro médio efetivo em cm;

S = área original da seção transversal do anodo em cm²;

0,6 = fator correspondente aos 60% remanescentes do anodo.

2.3.7 Dimensionamento do sistema de proteção catódica galvânica para estruturas enterradas

O dimensionamento de um sistema galvânico para estruturas enterradas, é muito parecido ao adotado para as estruturas marítimas. A corrente requerida para a proteção, por exemplo, tem o mesmo roteiro de cálculo nas duas aplicações. Porém, certas etapas são muito diferentes, além das limitações inerentes ao próprio uso de anodos galvânicos no solo.

Segundo Dutra e Nunes (2011), com relação ao material dos anodos, as ligas de alumínio não tem sido muito utilizadas no solo e, por esta razão, tem-se pouca experiência com elas. Destacam-se para essa aplicação os anodos com ligas de zinco e ligas de magnésio.

2.3.7.1 Enchimento condutor

A principal diferença entre a colocação de um anodo no mar e em terra é que, em terra o anodo requer um envoltório, constituído de um material homogêneo e de baixa resistividade elétrica, chamado de “enchimento condutor”.

Segundo Dutra e Nunes (2011), as heterogeneidades dos solos naturais favorecem a formação de pilhas de corrosão no próprio ânodo, reduzindo sua eficiência. Por outro lado, os fosfatos, carbonatos, e bicarbonatos podem formar uma película de alta resistência sobre a superfície dos anodos, que diminuirá a sua produção de corrente útil. Para evitar problemas assim, que o enchimento, além de ser homogêneo, é constituído de materiais isento desses compostos. Na Figura 15 é apresentado uma tabela da composição dos enchimentos condutores para anodos galvânicos.

Figura 15 - Composição dos enchimentos condutores para anodos galvânicos

Tipo	Gesso hidratado ($CaSO_4.2H_2O$) %	Bentonita %	Sulfato de Sódio %	Resistividade ohm.cm
1	25	75	–	250
2	50	50	–	250
3	75	20	5	50

Notas: a) O enchimento tipo 1 é usado em solos de baixa umidade, tendo em vista a habilidade da bentonita em reter água.
b) O enchimento tipo 2 é recomendado para uso em condições gerais.
c) O tipo 3 é recomendado para solos de resistividade mais alta.

Fonte: (DUTRA; NUNES, 2011)

2.3.7.2 Cálculo da corrente liberada por um anodo enterrado no solo

É através da Lei de Ohm que se calcula a corrente liberada por um anodo galvânico enterrado no solo:

$$i = \Delta V / R$$

em que

ΔV = força eletromotriz disponível em V;

R = resistência de contato anodo/solo.

Vale lembrar que, no solo, o anodo é instalado com o enchimento condutor, conforme ilustrado na Figura 16. Por esse motivo, calcula-se primeiro a resistência de contato anodo/enchimento, a resistência do próprio enchimento e a resistência enchimento/solo, desprezando as demais:

$$R = R\ anodo/ench + R\ ench + R\ ench\ /\ solo$$

A resistência de contato anodo/enchimento e enchimento/solo, é calculada mediante emprego da fórmula de Dwight, usando as dimensões e as resistividades correspondentes. Já a resistência do próprio enchimento é calculada mediante a fórmula clássica que dá a resistência de um condutor, ou seja:

$$R = \rho \,.\, L / S$$

em que

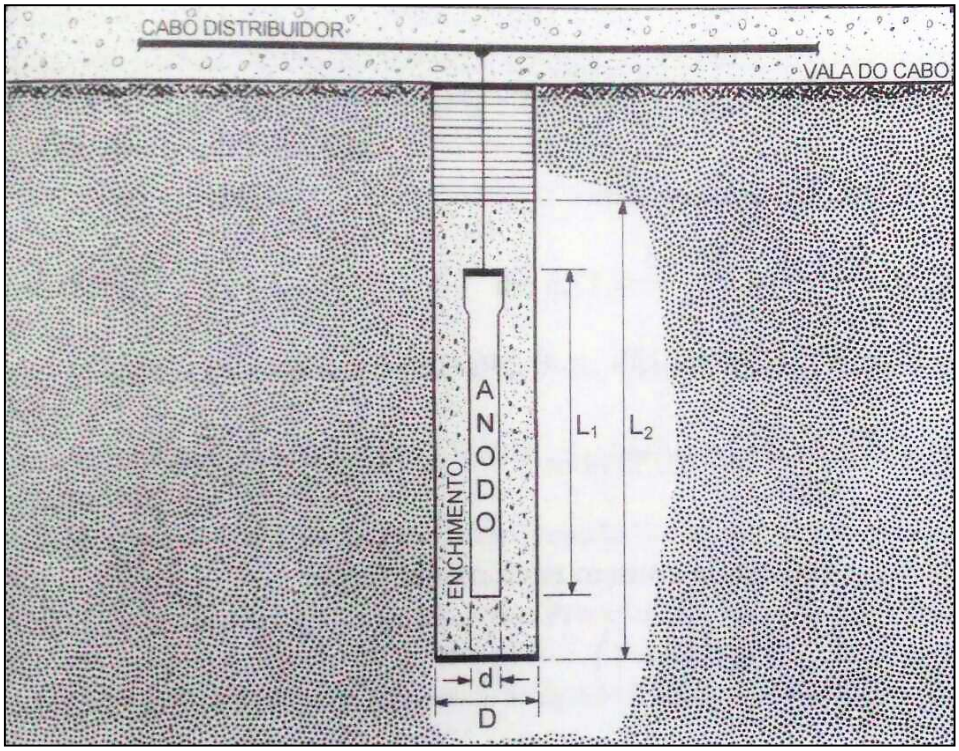
R = resistência da coluna de enchimento em ohm;

ρ= resistividade elétrica do enchimento em ohm.cm;

L = comprimento do condutor em m. Como a corrente circula do anodo para o solo, através do enchimento, este comprimento corresponde a espessura da camada de enchimento entre o anodo o solo. Pode ser determinada pela diferença entre o raio da coluna de enchimento e o raio do anodo;

S = área da seção transversal no enchimento em cm^2.

Figura 16 - Esquema de um anodo galvânico instalado no solo



Fonte: (DUTRA; NUNES, 2011)

3 EXPERIMENTO E RESULTADOS

Neste capítulo é detalhado a experiência realizada para a comprovação da eficiência do sistema de proteção catódica. Realizada por meio de corpos de prova, todos cálculos, considerações adotadas e registros fotográficos estão aqui apresentados.

3.1 CÁLCULOS E CONSIDERAÇÕES ADOTADAS

Neste item são apresentadas todas as considerações e cálculos necessários para o dimensionamento da proteção catódica utilizada no experimento. Dentre os dois tipos de dimensionamentos citados neste trabalho, o dimensionamento do sistema galvânico para estruturas marítimas foi escolhido devido às características similares com o experimento.

3.1.1 Densidade de corrente de proteção

Adotando-se para nosso experimento a resistividade (ρ) da água salgada, no valor de 30 ohm.cm, temos o seguinte valor para a densidade de corrente de proteção do aço(d):

$$d = 73,73 - 13,35.log\ \rho$$

$$d = 73,73 - 13,35.log\ 30$$

$$d = 73,73 - 13,35.\ 1,48$$

$$d = 73,73 - 19,76$$

$$d = 53,97\ mA/m^2 \text{ ou}$$

$$d = 0,05397\ A/m^2$$

3.1.2 Eficiência dos revestimentos

Como o experimento deste trabalho consiste em corpos de prova em que a armadura a ser protegida não possui qualquer tipo de revestimento, utilizou-se E = 0, situação em que a corrente requerida não é minorada. Pode-se verificar na Imagem 01, que além de nenhum revestimento, a armadura não possuía qualquer ponto de oxidação.

Imagem 1 - Armadura em aço sem revestimento

Fonte: Dos Autores

3.1.3 Fator de velocidade

Os corpos de prova, utilizados na experiência, foram colocados dentro de um recipiente com água salgada, e assim ficaram por 40 dias. Não existiu, durante a experiência, nenhum movimento mecânico que justificasse um fator velocidade maior que o mínimo fornecido pelo gráfico da Figura 14, ou seja, f = 1,01.

3.1.4 Área a proteger

A Imagem 01 mostra a armadura em aço, sem revestimento, para um corpo de prova antes de sua concretagem. Para construí-la foram necessárias quatro barras com 24 cm lineares de aço 5/16” e duas barras com 40 cm lineares de aço 3/16” (estribos).

Pelo formato geométrico das barras utilizadas, a fórmula utilizada para o cálculo da área total de um cilindro circular reto ($A_{cilindro}$) é a mais adequada:

$$A_{cilindro} = 2\pi r.(h + r)$$

em que

$A_{cilindro}$ = área total da superfície do cilindro

h = altura

r = raio do cilindro.

Com o auxílio da fórmula acima, a área total (At) da armadura utilizada em um corpo de prova é obtida pela seguinte expressão:

$$At = 4.\ [2.\pi.r.(h + r)] + 2.\ [2.\pi.r.(h + r)]$$

em que

Quantidade	Tipo	Diâmetro (cm)	Raio (cm)	Altura (cm)
4	Aço 5/16”	0,80	0,40	24
2	Aço 3/16”	0,48	0,24	40

logo:

$$At = 4.\ [2.\pi.0,4.(24 + 0,4)] + 2.\ [2\pi.0,24.(40 + 0,24)]$$

$$At = 4.\ [2.\pi.0,4.(24,4)] + 2.\ [2\pi.0,24.(40,24)]$$

$$At = 4.\ [61,32] + 2.\ [60,68]$$

$$At = 245,28 + 121,36$$

$At = 366,64\ cm^2$ ou

$At = 0,036664\ m^2$

3.1.5 Coeficiente de segurança

A faixa de variação deste coeficiente é de 1,2 a 3 em que para situações com baixa aeração e pouca movimentação do meio utilizam-se valores próximos do início da faixa e para ambientes com forte aeração e muita movimentação o final da faixa.

Por estas razões, o coeficiente adotado no experimento deste trabalho foi 1,2.

3.1.6 Cálculo da corrente requerida

Uma vez definidos e/ou calculados esses fatores, pode-se finalmente obter a intensidade da corrente elétrica requerida para a proteção da armadura do experimento realizado.

$$I = S \,.\, d \,.\, f \,.\, (1 - E) \,.\, K$$

$$I = 0,036664 \,.\, 0,05397 \,.\, 1,01 \,.\, (1 - 0) \,.\, 1,\ 2$$

$$I = 0,036664 \,.\, 0,05397 \,.\, 1,01 \,.\, 1 \,.\, 1,2$$

$$I = 0,002398\ A$$

$$I = 2,40\ mA$$

3.1.7 Cálculo da massa dos anodos

De posse dos parâmetros iniciais, calcula-se a massa total de anodos (M) para o período de tempo desejado.

$$M = 8760 \,.\, V \,.\, I \,/\, F \,.\, C$$

em que

M = massa total de anodo que deseja-se calcular, em kg;

V = 20 anos de vida;

I = 0,0024 A de intensidade da corrente requerida;

C = 2800 A.h/kg de capacidade de corrente do alumínio;

F = 0,85;

Assim, obtivemos uma massa de:

$$M = 8760 \,.\, 20.\ 0,0024 \,/\, 0,85 \,.\, 2800$$

$$M = 0,1767\ kg$$

3.1.8 Cálculo do número de anodos

O número de anodos é obtido por meio da divisão da massa total requerida pela massa unitária do anodo escolhido. Utilizando um anodo de massa igual 0,1767 kg:

$$N = M / m$$

$$N = 0,1767 / 0,1767$$

$$N = 1 \ anodo$$

3.1.9 Cálculo da resistência do circuito

A resistência do circuito, em Ohm, é determinada pela expressão abaixo.

$$R = \rho \, . \, [\, ln(8L/D) - 1] \, / \, 2\pi L$$

em que

R = resistência em ohm;

ρ = resistividade elétrica do eletrólito = 30 ohm.cm;

L = comprimento do anodo = 32 cm;

D = diâmetro médio efetivo do anodo em cm;

Como o anodo utilizado no experimento era uma peça de alumínio de seção transversal quadrada e não maciça, o diâmetro efetivo foi determinado pela fórmula:

$$D = 2\sqrt{\frac{0,6S}{\pi}}$$

em que

D = diâmetro médio efetivo em cm;

S = área original da seção transversal do anodo = 0,96 cm².

$$D = 2\sqrt{\frac{0,6 \, . \, 0,96}{\pi}}$$

$$D = 2\sqrt{\frac{0,576}{\pi}}$$

$D = 0,856\ cm$

sendo assim

$R = \rho \,.\, [\ ln(8L/D) - 1] \,/\, 2\pi L$

$R = 30 \,.\, [\ ln(8L/D) - 1] \,/\, 2\pi L$

$R = 30 \,.\, [\ ln(8.32/0,856) - 1] \,/\, 2.\pi.32$

$R = 30 \,.\, [\ 5,7 - 1] \,/\, 64.\pi$

$R = 30 \,.\, [\ 4,7] \,/\, 64.\pi$

$R = 141/\ 64.\pi$

$R = 0,7\ \Omega$

3.1.9 Cálculo da corrente liberada por um anodo

A corrente (i) liberada por um anodo é calculada pela Lei de Ohm:

$i = \Delta V \,/\, R$

em que

i = Corrente liberada em A;

ΔV = Força eletromotriz disponível = -1,05 V;

R = resistência do circuito calculada = 0,7 Ohm.

temos então

i = - 1,05 / 0,7

i = - 1,5 A

O sinal negativo serve somente para indicar o sentido da corrente no circuito.

3.1.10 Cálculo da corrente liberada pelos N anodos

De posse do número total de anodos, calcula-se a quantidade de corrente elétrica (I) liberada por N anodos. Nesse experimento, de acordo com a pequena quantidade de aço a ser protegida, foi utilizado apenas 1 anodo:

$$I = N \cdot i$$

em que

I = corrente total liberada em A;

N = número de anodos = 1;

i = corrente liderada por um anodo no meio considerado = -1,5 A.

$$I = 1 \cdot (-1,5)\ A$$

$$I = -1,5\ A$$

Segundo Dutra e Nunes (2011), para atender um projeto é necessário que a corrente elétrica liberada pelos anodos seja maior ou igual que a corrente elétrica requerida para a proteção. É possível constatar que a quantidade de anodo adotada atende os 20 anos de uso do sistema.

3.2 EXPERIÊNCIA

Para a realização dos experimentos, foram moldados corpos de prova conforme mostra a Imagem 02.

Imagem 2 - Corpos de prova moldados

Fonte: Dos Autores

Em dois corpos de prova, o cobrimento não foi respeitado com o intuito de simular um erro construtivo, seja provocado pela falta de espaçadores ou por imperícia durante a execução. Outra falha bastante comum no processo construtivo é a ocorrência de falhas na concretagem, que são popularmente chamadas de “bicheiras”, esse tipo de falha provoca exposição do aço presente no concreto armado a agentes que provocam a oxidação, portanto simulou-se, nos corpos de prova, a ocorrência dessas falhas, como mostra a Imagem 03.

Imagem 3 - Simulação de falhas na concretagem

Fonte: Dos Autores

Devido a dissolução de hidróxidos, presentes no cimento, o aço é submetido a um ph entre 13 e 14 que forma uma camada de passivação, este filme de proteção foi removido a fim de expor o aço à oxidação.

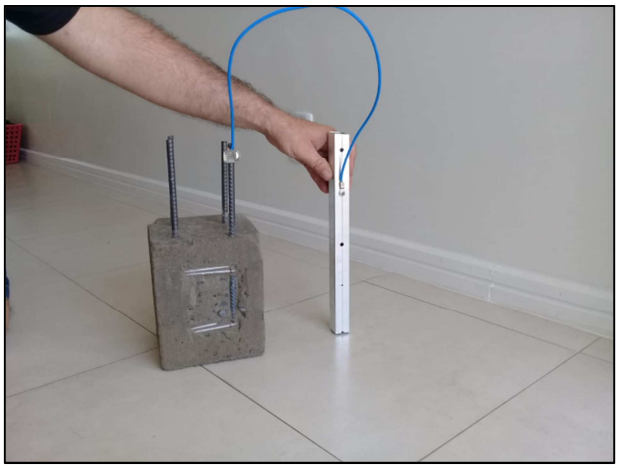
O sistema de proteção catódica foi executado em um dos corpos de prova, o qual foi chamado de CP01. O processo consiste em ligar eletricamente o aço presente na armadura a um material mais eletronegativo, no caso escolhido o alumínio. O alumínio, escolhido com o auxílio da Tabela 2, servirá como anodo de proteção.

As Imagens 04 e 05 mostram o processo de ligação, por meio de um fio de cobre, entre ânodo de proteção e a armadura a ser protegida.

Imagem 4 - Ligação elétrica na armadura do CP01

Fonte: Dos Autores

Imagem 5 – Detalhe da ligação entre a armadura.e o anodo

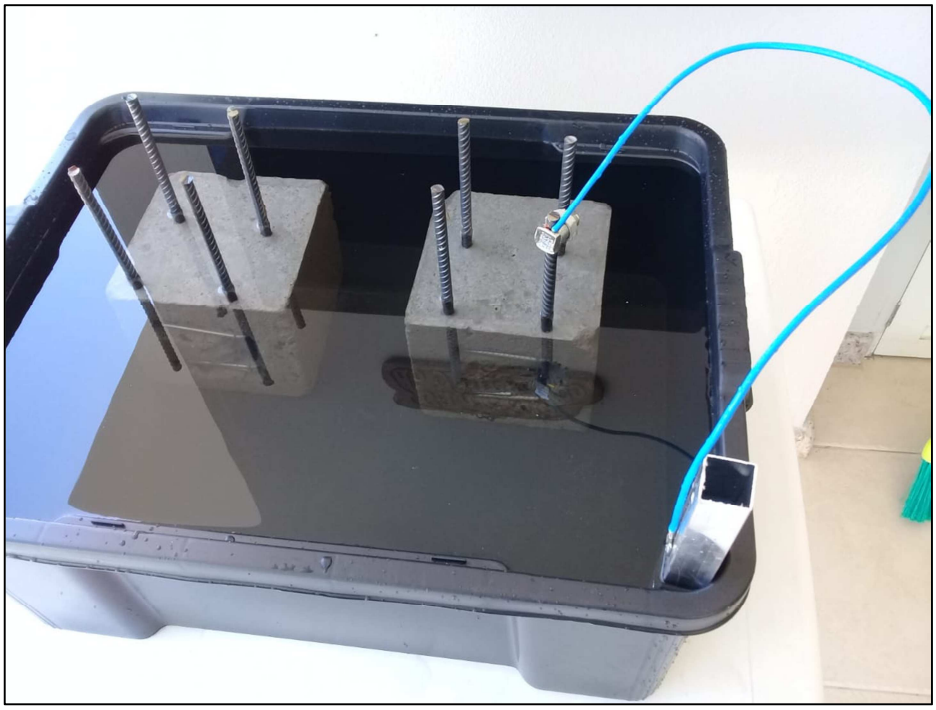


Fonte: Dos Autores

Posteriormente à realização da proteção catódica no CP01, os dois corpos de prova foram expostos a um meio aquoso com uma concentração de 3% de NaCl, simulando água do mar. A classe de agressividade, segundo a NBR 6118-2014, foi avaliada em IV (muito forte).

A Imagem 06 mostra os dois corpos submersos, em que é possível perceber o CP01 à direita, e o corpo de prova da esquerda que não foi submetido ao sistema de proteção catódica, chamado de CP02.

Imagem 6 - Corpos de prova submetidos a um meio aquoso a 3% de NaCL



Fonte: Dos Autores

Após 1h do início do experimento, pode-se perceber que o corpo de prova sem proteção (CP02) mostra pequenos sinais de corrosão, enquanto que o corpo de prova com a proteção catódica instalada (CP01) não apresenta sinais de corrosão. A diferença do início do processo de corrosão pode ser observada comparando as Imagens 07 e 08.

Imagem 7 - Início do processo de corrosão do aço no CP02

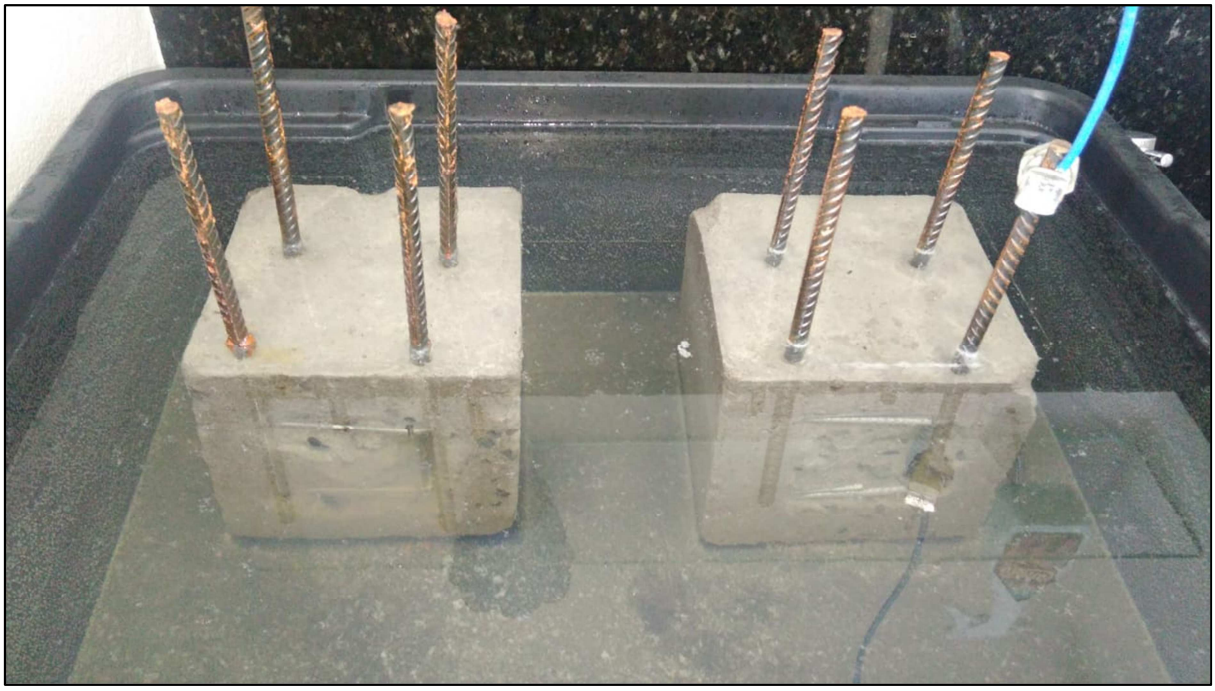
Fonte: Dos Autores

Imagem 8 - Início do processo de corrosão do aço no CP01

Fonte: Dos Autores

A partir da Imagem 09, pode-se perceber a importância do meio eletrólito para o processo de proteção catódica, uma vez que a parte da armadura exposta ao ar apresentou oxidação em ambos os casos, portanto o processo de proteção catódica é eficaz somente na região que exista o meio eletrólito.

Imagem 9 - Corrosão do aço - importância do meio eletrólito



Fonte: Dos Autores

O processo de oxidação ocorreu de forma bastante acelerado devido a agressividade do meio, em apenas 10 dias após o início do experimento os corpos de provas apresentaram diferenças significativas do processo de corrosão. Como pode ser analisado nas Imagens 10 e 11, percebe-se que toda a armadura do corpo de prova CP02, sem proteção, está submetida a uma camada significativa de oxidação, enquanto que a parte submersa do corpo de prova CP01 não apresentou sinais de corrosão.

Imagem 10 - CP02 com 10 dias de ensaio

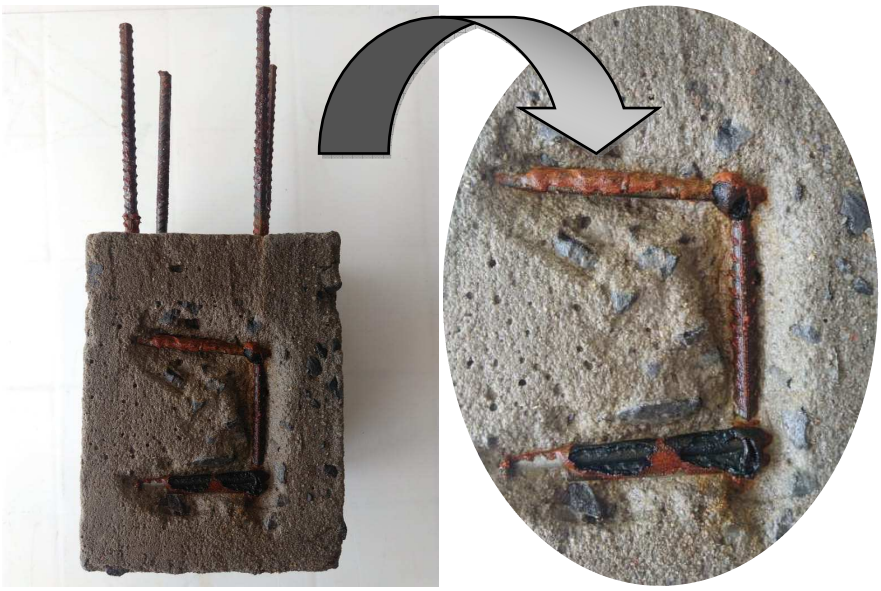
Fonte: Dos Autores

Imagem 11 - CP01 com 10 dias de ensaio

Fonte: Dos Autores

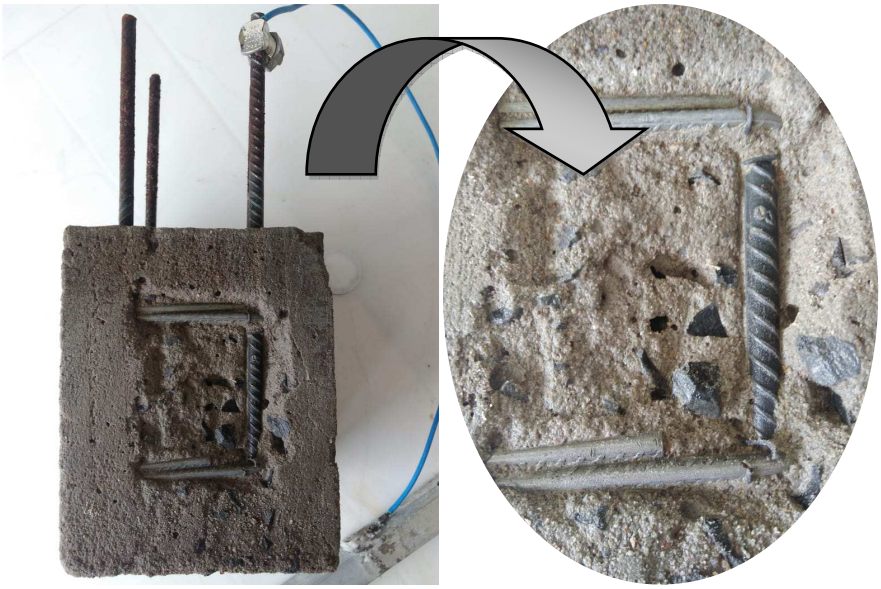
Após 40 dias de ensaio, percebesse uma evolução da oxidação muito acentuada no corpo de prova CP02, Imagem 12, enquanto o corpo de prova CP1 continua com a parte da armadura submersa intacta, Imagem 13. O sistema de proteção catódica se mostrou muito eficiente, visto que combateu a corrosão, apresentando-se de maneira adequada para a proteção de armaduras do concreto armado, quando expostos a agressividade alta.

Imagem 12 - CP02 com 40 dias de ensaio



Fonte: Dos Autores

Imagem 13 - CP01 com 40 dias de ensaio



Fonte: Dos Autores

4 APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

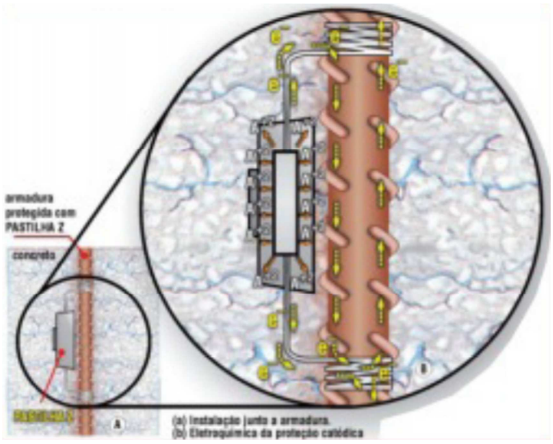
O sistema de proteção catódica pode ser implementado tanto no concreto armado quanto no concreto protendido, pois mais importante que as especificidades de cada projeto, é o meio em que a estrutura a ser protegida se encontra.

O sistema de proteção pode ser implementado tanto da fase de projeto, que diminui os custos de implementação de mão de obra, quanto na fase de recuperação estrutural.

4.1 PROTEÇÃO DE PEQUENAS ÁREAS

A proteção catódica galvânica de pequenas áreas pode ser executada utilizando pastilhas, que pode ser de zinco ou alumínio, instaladas conforme a Figura 17.

Figura 17 - Instalação de pastilhas de proteção



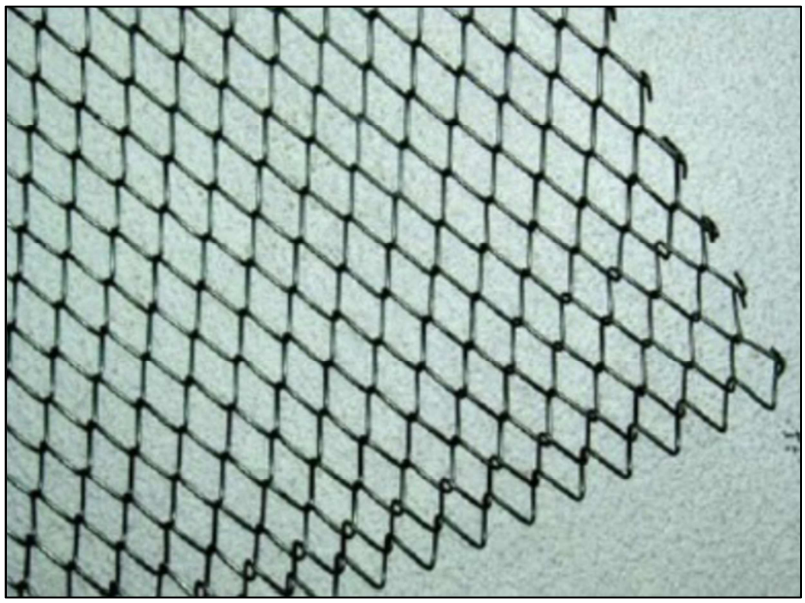
Fonte: LIMA, Kleyton de Oliveira, 2018.

A ligação elétrica entre a pastilha, que servirá de ânodo, e a armadura a ser protegida, deve ser realizada com muito cuidado e avaliada no momento da concretagem. Na utilização dessa técnica na recuperação de estruturas em que o processo de corrosão já se iniciou, deve- se executar e garantir excelente limpeza na região dos contatos elétricos, a fim de estabelecer o circuito entre o ânodo e o catodo.

4.2 PROTEÇÃO DE GRANDES ÁREAS

Para executar a proteção de grandes áreas de concreto armado ou protendido é indicado utilizar a tela galvânica, mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Tela galvânica de proteção



Fonte: LIMA, Kleyton de Oliveira, 2018.

Esse tipo de proteção deve ser fixado diretamente na armadura. No processo de concretagem deve-se usar um ativador eletroquímico na proporção de 2% em relação ao peso do cimento utilizado.

4.3 PROTEÇÃO EM PILARES DE PONTES

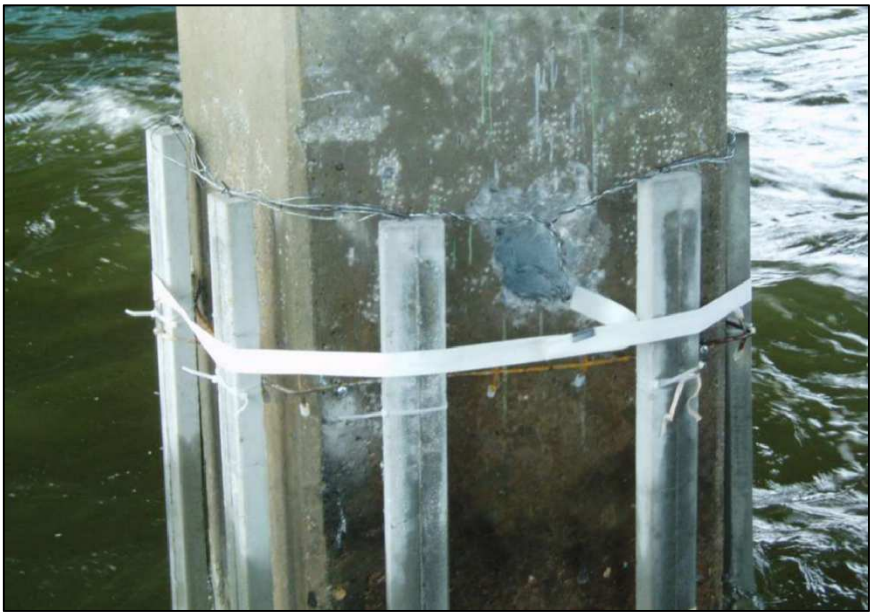
A técnica de proteção catódica pode ser utilizada na proteção de pilares de pontes, como realizado na ponte de San Leandro, Califórnia. Para a implementação do sistema foram executados furos nos pilares, onde se realizou a ligação elétrica entre a armadura e o ânodo de proteção, conforme mostra a Imagem 14. (WHITMORE, 2018)

Imagem 14 - Furos para efetuar a ligação elétrica entre o ânodo e cátodo

Fonte:WHITMORE, David, 2018.

A Imagem 15 mostra a instalação dos ânodos de proteção para posteriormente a aplicação do encamisamento, conforme mostra Imagem 16.

Imagem 15 - Instalação dos ânodos



Fonte:WHITMORE, David, 2018.

Imagem 16 - Encamisamento do sistema de proteção

Fonte:WHITMORE, David, 2018.

4.4 PROTEÇÃO EM PIER E ESTRUTURA PORTUÁRIA

O sistema de proteção catódica é bastante utilizado em obras portuárias, conforme Imagem 17, o sistema de proteção é similar ao processo executado na proteção de pilares submersos ou qualquer outro projeto de proteção catódica em concreto.

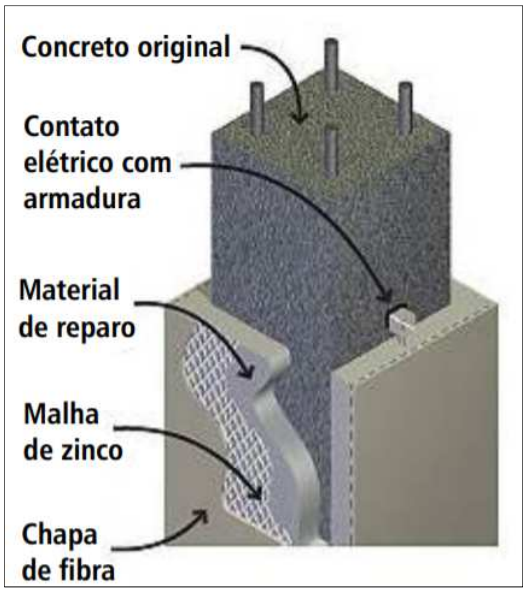
Imagem 17 - Proteção catódica em obras portuárias

Fonte:WHITMORE, David, 2018.

Uma tecnologia de proteção catódica bastante utilizada em obras portuárias é o sistema de proteção catódica galvânica, utilizando LifeJacket, representado na Figura 19, em que o anodo é uma malha de Zinco coberto por uma chapa de fibra.

Na realização da proteção catódica mostrada na Imagem 18, foram recuperados e protegidos 668 pilares protendidos, utilizando jaquetas galvânicas de 2 a 10 metros de comprimento, a fim de utilizar uma taxa de 7,8 Kg de anodo de zinco por metro quadrado a ser protegido.

Figura 19 - Jaqueta galvânica



Fonte: Engeground.

Imagem 18 - Proteção catódica em estacas utilizando jaquetas galvânicas

Fonte: Engeground.

O sistema de proteção catódica em obras portuárias não se limita apenas em pilares e estacas submersas, podendo ser aplicadas em qualquer peça de concreto. A Imagem 19 exibe a recuperação e a proteção catódica de vigas submetidas a uma classe de agressividade elevada, podendo citar, como exemplo a recuperação de 2000 m de vigas no porto de Canaveral - Flórida, em que se removeram 20 cm de concreto e após se instalaram barras de anodo ao longo de toda a estrutura, cada barra possui uma área transversal de 6,25 cm2 com comprimento de 2,5m. (WHITMORE, 2018)

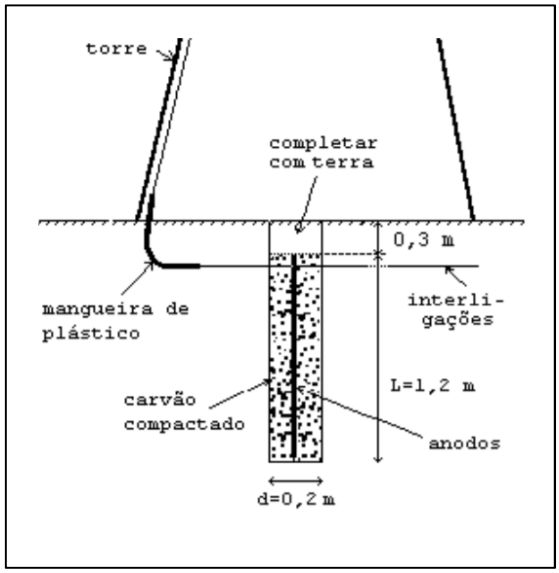
Imagem 19 - Recuperação e proteção catódica de vigas no Porto de Canaveral - Flórida

Fonte:WHITMORE, David, 2018.

4.5 PROTEÇÃO DE FUNDAÇÕES

O sistema de proteção catódica pode ser em qualquer tipo de fundação, sendo bastante utilizado, em fundações de torres de transmissão. Segundo Hoffmann e Silva (2005), as torres de transmissão da Companhia Paranaense de Energia – COPEL estão em sua grande maioria, em locais sujeitos a corrosão da armadura. Devido à grande dificuldade em manter uma fonte de corrente contínua junto às torres, em alguns casos utiliza-se o sistema fotovoltaico, porém já existe sistema que emprega a energia induzida pelo próprio campo elétrico linha de transmissão para gerar a corrente necessária para efetuar a proteção da estrutura. A Figura 20 mostra o esquema de instalação dos ânodos de proteção.

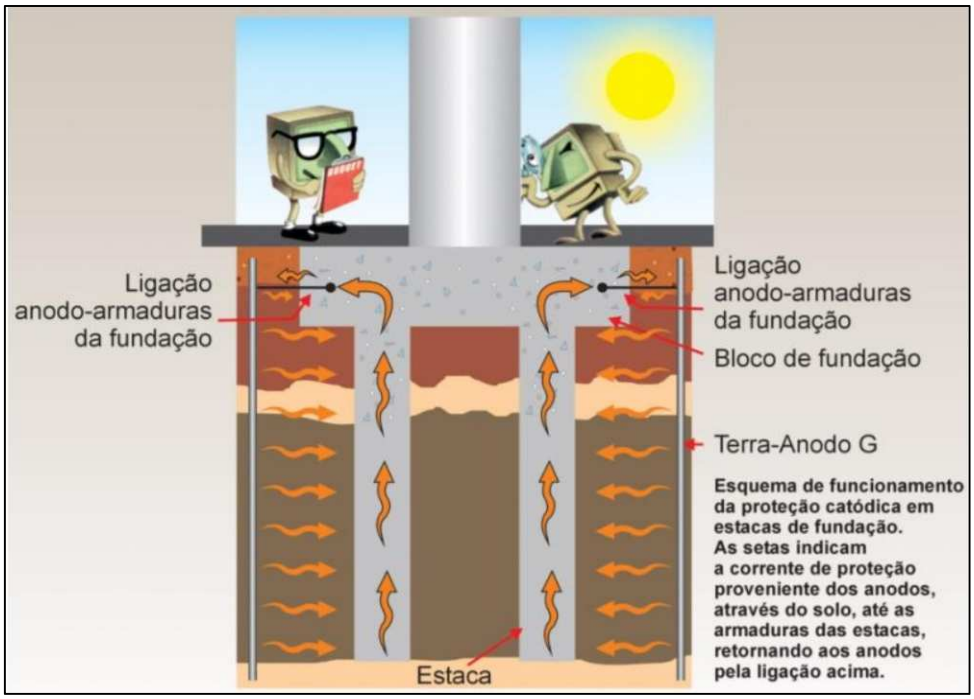
Figura 20 - Esquema de instalação do anodo em torre de transmissão



Fonte: HOFFMANN, João Nelson,2015.

A proteção de fundação pode ocorrer em fase de projeto que apresenta menor custo de execução ou após se identificar processos de corrosão, a fim de interromper o procedimento. A proteção galvânica de uma fundação por estaca pode ser vista na Figura 21, em que dois ânodos foram cravados ao lado da estaca a ser protegida, executando, na parte superior, a ligação elétrica entre a estava e o ânodo de proteção.

Figura 21 - Esquema de proteção de estacas



Fonte: ILIESCU, Marcelo, 2018

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo proporcionou um amplo entendimento do funcionamento do sistema de proteção catódica. Além disso, possibilitou um aprofundamento significativo do processo de corrosão do aço, entendimento fundamental para a compreensão do sistema de proteção catódica, seja ele galvânico ou por corrente impressa.

A proteção catódica, atuante mesmo em estruturas enterradas ou submersas, é uma ferramenta que possibilita um aumento significativo da vida útil da estrutura, gerando grande economia e evitando transtornos com futuras intervenções estruturais.

Ainda pouco frequente na engenharia, o uso do sistema de proteção catódica por corrente impressa ou sistema de proteção catódica galvânica requer que toda a armadura de aço a ser protegida esteja interligada, de modo que se tenha um único contato elétrico. Além disso, a proteção catódica não funciona para estruturas metálicas expostas ao ar, sem um meio eletrolítico, necessário para a transição dos elétrons que fluem do anodo (metal de sacrifício) para o catodo (metal a ser protegido).

O processo de dimensionamento e simulação do sistema de proteção catódica, realizado por meio de corpos de prova, deixou mais evidente a importância de sua instalação nas obras de engenharia, principalmente em regiões com elevada classe de agressividade. Pode-se perceber claramente que as partes das armaduras que não estavam imersas ao meio eletrolítico, ficaram oxidadas ao longo do ensaio. Essa análise corrobora com a afirmação da necessidade de um meio eletrolítico. Por meio dos registros fotográficos do experimento é possível analisar que o aço, mesmo submetido à situações favoráveis à corrosão, aplicando a proteção catódica galvânica ficou intacto, mostrando a eficiência do processo.

A vantagem principal que o sistema de proteção catódica apresenta é proteger uma estrutura metálica onde a manutenção preventiva torna-se impossível, como por exemplo estacas metálicas, o aço do concreto armado e tubulações do gá natural canalizado. Dada a importância desse sistema, sua disseminação dentro das universidades deveria ser melhorada.

REFERÊNCIAS

ALVES, Flávia. **InfoQuimica:** Corrosão: um fenômeno químico. 2018. Disponível em: <http://infoquimica2c.blogspot.com/2014/07/corrosao-um-fenomeno-quimico-de-um-modo_ 99.html>. Acesso em: 02 jun. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 6118 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2014. 238 p.

CESAR, Paulo. **Portal de Estudos em Química.** 2018. Disponível : <http://www.profpc.com.br/>. Acesso em: 02 jun. 2018.

CORROSÃO & PROTEÇÃO: Ciência e tecnologia em corrosão. Rio de Janeiro: Abraco, v. 55, 2015. Disponível em: <http://www.abraco.org.br/src/uploads/2015/10/Revista-corrosao-e-protecao-55.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2018.

CORSINI, Rodnei. **Infraestrutura urbana:** Proteção catódica. 2018. Disponível em: <http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/14/3-protecao-catodica-metodo- e-usado-para-protecao-anticorrosiva-257602-1.aspx>. Acesso em: 02 jun. 2018.

DUTRA, Aldo Cordeiro; SILVA, José Rocha Andrade da. **PRINCÍPIOS DA CORROSÃO.** 1999. Disponível em: <http://antiferrugem.tripod.com/page8.htm>. Acesso em: 02 jun. 2018.

DUTRA, Aldo Cordeiro; NUNES, Laerce de Paula. **Proteção Catódica:** Técnica de Combate a Corrosão. 5. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 344 p.

ENGEGROUND. **Proteção catódica área portuária.** Disponível em: <http://engeground.com.br/catalogos/protecao_catodica_portuaria.pdf>. Acesso em: 21 out. 2018.

GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1982. 453 p.

GOMES, Luis Paulo. **Sistemas de Proteção Catódica.** 2. ed. São Paulo: Diagraphic, [1990]. 261 p.

ILIESCU, Marcelo. Recuperação struturas Deterioras por corrosão Disponível em http://www.iliescu.com.br/palestras/recuperacao_de_estruturas_deterioradas_por_corrosao.pdf . Acesso em: 21 out. 2018.

JONES, Denny A.. **Principles and prevention of corrosion.** 2. ed. Upeer Saddle River: Prentice-hall, 1996.

LIMA, Kleyton de Oliveira; PEREIRA, Fábio Sergio da Costa. **Técnicas Eletroquímicas Aplicáveis em Estruturas de Concreto Armado e protendido: Estado a Arte.**Disponível em: http://www.revistaunirn.inf.br/revistaunirn/index.php/revistaunirn/article/viewFile/ 411/354 . Acesso em: 15 out. 2018.

MARQUES, Vinícius Silveira. **Recuperação de Estruturas Submetidas à Corrosão de Armaduras: Definição das variáveis que interferem no custo.** 2015. 104 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em:<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/138345/000989636.pdf?sequence=1>Acesso em: 28 abr. 2018.

FURTADO, Paulo. **Introdução à corrosão e proteção das superfícies metálicas.** Belo Horizonte: Ufmg, 1981.

HOFFMANN, João Nelson; SILVA, José Maurílio da. **Proteção Contra Corrosão Nas Fundações Das Torres Metálicas, Utilizando Energia Induzida Pelo Campo Elétrico Da Linha de Transmissão.** 2005. Disponível em: <http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/2/002-06.pdf>. Acesso em: 21 out. 2018.

PORTAL CIMM. **O mecanismo de corrosão nos aços.** 2018. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6346>. Acesso em: 28 abr. 2018.

QUINTAL, Valentina. **Métodos de Comb. à corrosão.** 2014. Disponível em: <http://slideplayer.com.br/slide/1353136/> Acesso em: 02 jun. 2018.

SILVA, L. K. da, Levantamento de Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado no Estado do Ceará. 51 f. Monografia de final de curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

VINÍCIUS ABBATE (São Paulo). **Téchne:** Proteção catódica contra a corrosão. 2003. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/77/artigo285278-1.aspx>. Acesso em: 28 abr. 2018.

WHITMORE, David. **PROTEÇÃO GALVÂNICA CONTRA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO.** Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/eventos/52cbc/ANCHORTEC.pdf>. Acesso em: 20 out. 2018.