



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Monografia de Especialização

"Estudo comparativo de eletrodo de liga especial de ferro-silício-cromo (FeSiCr) e eletrodo de Zinco (Zn)"



Autor: Paulo Henrique Borges de Menezes

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis



Novembro de 2022



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Paulo Henrique Borges de Menezes

" Estudo comparativo de eletrodo de liga especial de ferro-silício-cromo (FeSiCr) e eletrodo de Zinco (Zn)"

Monografia de Especialização apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Materiais – Não Ferrosos.

Área de concentração: Engenharia de Superfícies

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Ouro Preto, novembro de 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M543e Menezes, Paulo Henrique Borges de.
Estudo comparativo de eletrodo de liga especial de ferro-silício-cromo (FeSiCr) e eletrodo de Zinco (Zn). [manuscrito] / Paulo Henrique Borges de Menezes. - 2022.
32 f.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis.
Produção Científica (Especialização). Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

1. Corrosão. 2. Metais - Proteção catódica. 3. Zinco. 4. Ferro-Silício-Cromo (Fe-Si-Cr). 5. Vida útil (Engenharia). I. Assis, Paulo Santos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 620.1

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo Henrique Borges de Menezes

Estudo comparativo de eletrodo de liga especial de ferro-silício-cromo (FeSiCr) e eletrodo de Zinco (Zn)

Trabalho de conclusão de curso de Especialização apresentado ao Programa da REDEMAT da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Materiais

Aprovada em 29 de novembro de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Paulo Santos Assis - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Jorge Luiz Brécia Murta - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende - Centro Federal de Educação Tecnológica, Araxá

Paulo Santos Assis aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Santos Assis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/12/2022, às 12:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0443651** e o código CRC **EE446080**.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. JUSTIFICATIVA	9
3. OBJETIVOS.....	9
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
5. DESENVOLVIMENTO	26
6. CONCLUSÕES	29
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	30
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formas de Corrosão.....	12
Figura 2 - Esquema de pilha eletroquímica	13
Figura 3 - Medição de potencial de um metal em relação ao solo	14
Figura 4 - Medição de diferença de potencial entre dois metais diferentes, no solo	17
Figura 5 - Exemplo de pilha galvânica entre o aço e o magnésio.....	18
Figura 6 - Proteção catódica por corrente impressa para uma tubulação enterrada A e para uma estaca de píer de atracação de navio.....	20
Figura 7 - Fluxograma simplificado do processo RLE.....	23
Figura 8 - Proteção catódica por anodo de zinco em casco de navio: (a) vista inferior do navio em dique seco; (b) fixação do anodo de zinco no casco do navio	24
Figura 9 - Processo de Produção Ferrossilício Cromo	25
Figura 10 - Áreas anódicas e catódicas de uma tubulação metálica enterrada	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial natural ou eletroquímico – Série galvânica prática	15
Tabela 2 - Vida útil eletrodos de Zn e FeSiCr	29

RESUMO

A corrosão é uma reação de óxido-redução que ocorre principalmente nos metais causando perdas de massa fragilizando a estrutura do material. Para que ocorra a corrosão deve existir o contato de metais com energia potencial diferentes ambos submetidos à um meio propício a circulação de elétrons ou íons. Este meio onde os metais estão submetidos é denominado eletrólito, o metal que recebe elétrons (redução) é o catodo e o metal que doa elétrons (oxidação) é o anodo da reação. Existem vários métodos de proteção dos metais, ou seja, métodos que eliminam, isolam ou controlam o contato e a corrente de elétrons que é gerada pela reação de óxido-redução. Um método muito utilizado é proteção catódica que pode ser uma proteção catódica galvânica ou proteção catódica por corrente impressa. Ambos os métodos de proteção catódica são eficientes e podem ser dimensionados levando em consideração vários fatores técnicos e financeiros. A estrutura a ser protegida pela proteção catódica é denominada de cátodo e o outro metal que vai sofrer o sacrifício de doar os elétrons e se desgastar é o anodo, normalmente denominado anodo de sacrifício. O desgaste dos anodos é um fator determinante para especificar o sistema de proteção catódica, existem vários tipos de materiais que são utilizados como anodos. O Zinco (Zn) é um metal muito indicado como anodo para proteção de embarcações pela facilidade de instalação e manutenção. Outro material utilizado na proteção catódica como anodo é o Ferro-Silício-Cromo (FeSiCr) que é uma liga especial utilizada na proteção catódica por corrente impressa. Este eletrodo de FeSiCr é considerado inerte, ou seja, sua vida útil é elevada em um ambiente com a corrente necessária para a proteção catódica controlada devido à sua baixa taxa de desgaste. Comparando o eletrodo de Zn com o eletrodo de FeSiCr para proteção catódica de tubulações de aço enterradas pode-se concluir que o eletrodo de FeSiCr é mais eficiente que o eletrodo de Zn, o fator mais relevante na comparação dos dois eletrodos em uma mesma condição é a taxa de perda de material dos mesmos.

Palavras-chaves: corrosão; proteção catódica; galvânica; corrente impressa; Zinco; Ferro-Silício-Cromo; vida útil.

ABSTRACT

Corrosion is an oxide-reduction reaction that occurs mainly in metals causing mass losses, weakening the material's structure. For corrosion to occur, there must be contact with metals with different potential energy, both submitted to a suitable environment for the circulation of electrons or ions. This medium where the metals are subjected is called electrolyte, the metal that receives electrons (reduction) is the cathode and the metal that donates electrons (oxidation) is the anode of the reaction. There are several methods of protecting metals, that is, methods that eliminate, isolate or control the contact and electron current that is generated by the oxidation-reduction reaction. A widely used method is cathodic protection, which can be galvanic cathodic protection or impressed current cathodic protection. Both methods of cathodic protection are efficient and can be scaled considering several technical and financial factors. The structure to be protected by cathodic protection is called the cathode and the other metal that will suffer the sacrifice of donating electrons and wearing out is the anode, normally called the sacrificial anode. Anode wear is a determining factor for specifying the cathodic protection system, there are several types of materials that are used as anodes. Zinc (Zn) is a metal very suitable as an anode for protecting ships due to its ease of installation and maintenance. Another material used in cathodic protection as anode is Ferro-Silicon-Chrome (FeSiCr) which is a special alloy used in cathodic protection by impressed current. This FeSiCr electrode is considered inert, that is, its useful life is high in an environment with the current necessary for controlled cathodic protection due to its low wear rate. Comparing the Zn electrode with the FeSiCr electrode for cathodic protection of buried steel pipes it can be conclude that the FeSiCr electrode is more efficient than the Zn electrode, the most relevant factor in comparing the two electrodes in the same condition is their material loss rate.

Key-words: corrosion; cathodic protection; galvanic; impressed current; Zinc; Ferro-Silicon-Chrome; lifespan.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Callister e Rethwisch (2018), a maioria dos materiais apresenta algum tipo de interação com o meio em maior ou menor grau. Tais interações comprometem a integridade dos materiais deteriorando suas propriedades mecânicas, físicas e também sua aparência.

Callister e Rethwisch (2018 p. 626) observaram que existe “uma perda efetiva de material, quer pela dissolução (corrosão) ou pela formação de uma incrustação ou filme não metálico (oxidação).”

Callister e Rethwisch (2018 p. 626) definem a corrosão “como o ataque destrutivo e não intencional de um metal; esse ataque é eletroquímico e começa normalmente na superfície.”

Um das proteções de superfície contra a corrosão é a chamada proteção catódica, onde envolve simplesmente o suprimento de elétrons para o metal a ser protegido forçando uma reação inversa de redução e não oxidação.

De acordo com Callister e Rethwisch outra técnica muito utilizada na proteção catódica é a utilização de um par galvânico:

[...] o metal a ser protegido é conectado eletricamente a outro metal que é mais reativo naquele ambiente específico. Esse último metal apresenta oxidação e, ao ceder elétrons, protege o primeiro metal contra corrosão. O metal oxidado é, com frequência, chamado de anodo de sacrifício, e o magnésio e o zinco são comumente usados para essa finalidade, visto que estão localizados na extremidade anódica da série galvânica. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018, p. 650).

As empresas de mineração que possuem minerodutos para transporte de seu produto ou subproduto em longas distâncias protegem os dutos de aço carbono destes minerodutos com a utilização do método de proteção catódica através do sistema de corrente impressa e normalmente utilizam eletrodo de sacrifício com liga específica de ferro-silício-cromo (FeSiCr).

Estes eletrodos de sacrifício de ligas especiais apesar de terem uma vida útil entre 15 a 20 anos em um sistema de corrente controlada (IEC, 2022), possuem valor elevado e não são de fácil acesso no mercado, ou seja, não são *commodities*.

Uma alternativa possível seria a substituição dos eletrodos de ferro-silício-cromo (FeSiCr) por eletrodos de zinco (Zn) que são mais acessíveis devido ao Zn ser uma *commodity* não sendo necessária a composição de uma liga especial para a fabricação dos eletrodos.

Assim este trabalho busca responder a seguinte hipótese de pesquisa: os eletrodos de Zinco (Zn) são mais viáveis tecnicamente como anodos na proteção catódica em tubos de aço carbono enterrados em solo comparados aos eletrodos de ligas de ferro-silício-cromo (FeSiCr)?

2. JUSTIFICATIVA

Com as atualizações tecnológicas dos processos de proteção contra a corrosão em metais, em específico a proteção catódica, as avaliações dos tipos de eletrodos de sacrifício vêm sendo atualizadas de forma que eletrodos de sacrifício mais simples, mais baratos e mais fáceis de serem encontrados no mercado possam substituir os eletrodos de ligas especiais mais complexos.

Eletrodos de ligas especiais como o ferro-silício-cromo (FeSiCr) não são facilmente acessíveis no mercado podendo causar danos nos dutos devido à falta ou ineficiência da proteção catódica no caso de atrasos na aquisição dos eletrodos ou falta dos mesmos.

Isto justifica a pesquisa para uma avaliação e uma comparação de eletrodos de zinco (Zn) na aplicação de proteção catódica em dutos de aço enterrados em solo, visto que o Zn é uma *commodity* de fácil acesso.

3. OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo de proteção catódica comparando os eletrodos de ferro-silício-cromo (FeSiCr) e zinco (Zn) como eletrodo de sacrifício para tubos de aço carbono enterrados em solo de forma que o conhecimento possa auxiliar os projetistas a escolherem o eletrodo mais adequado de acordo com a aplicação.

Objetivos específicos

- a) Apresentar as vantagens e desvantagens da proteção catódica galvânica e por corrente impressa;
- b) Comparar o eletrodo de sacrifício de Zinco (Zn) e de FeSiCr (ferro-silício-cromo) pelo cálculo teórico da vida útil.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Corrosão Metálica

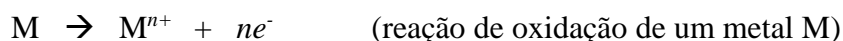
A corrosão metálica é considerada por Callister e Rethwisch (2018) como um ataque eletroquímico que começa normalmente pela superfície de um metal. Esse ataque é destrutivo e não intencional podendo gerar uma perda de material por dissolução (corrosão) ou formação de incrustação (oxidação).

A IEC, que é uma empresa brasileira com experiência de 50 anos nas atividades de proteção catódica, define em seu livro que a corrosão metálica é:

[...] fruto de reações eletroquímicas que envolvem os metais e um eletrólito. O eletrólito é composto, de um modo geral, de substâncias químicas ionizáveis, tais como sais, bases ou ácidos e água, as quais, em contato com a água, formam soluções condutoras de eletricidade, propiciando a formação de pilhas capazes de gerar uma corrente elétrica (IEC, 2020, p. 1).

De acordo com a IEC (2020, p. 1) “os solos, por mais secos que pareçam, sempre contêm água e funcionam, normalmente, como excelentes eletrólitos para a passagem dessa corrente”, corrente esta gerada pela reação eletroquímica entre os metais e o eletrólito.

Quando os átomos dos metais perdem ou cedem elétrons a reação é denominada reação de oxidação. Ao contrário, quando os átomos dos metais recebem elétrons a reação é denominada reação de redução (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).



4.2. Tipos de Corrosão

A corrosão pode ocorrer de diferentes formas, estas podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou forma de ataque e as diferentes causas e seus mecanismos de ocorrência (GENTIL, 2011).

Segundo Gentil (2011) a morfologia (aparência) de uma corrosão se apresenta como: uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular (ou intercristalina), intragranular (ou transgranular ou transcristalina), filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio.

Quanto às causas e seus mecanismos a corrosão ser classificada como corrosão por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão tensão fraturante), em torno de cordão de solda, seletiva (grafítica e dezincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio (GENTIL, 2011).

A figura 1 ilustra os diferentes tipos de corrosão quanto à morfologia e quanto às causas e seus mecanismos.

Figura 1 - Formas de Corrosão



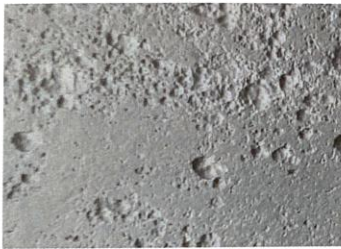
Uniforme



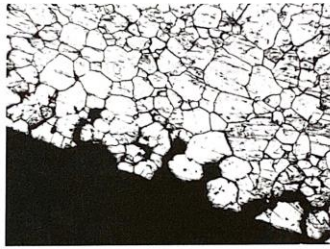
Em placas



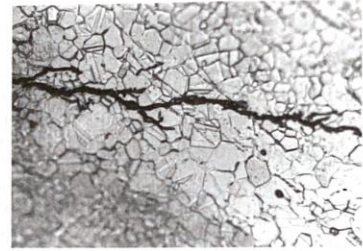
Alveolar



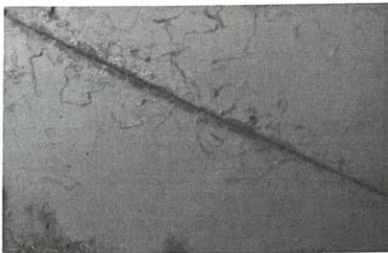
Puntiforme (pite)



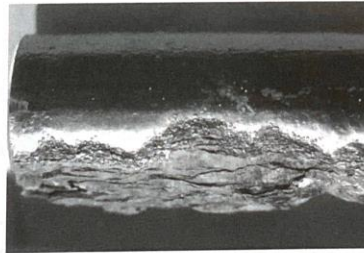
Intergranular



Transgranular



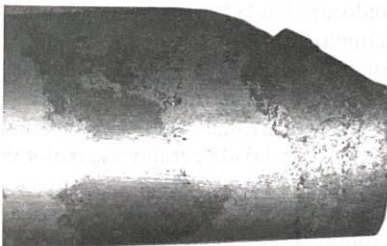
Filiforme



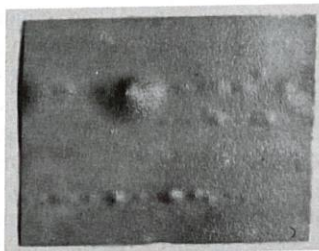
Por esfoliação



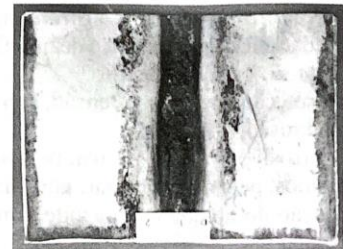
Grafítica



Dezincificação



Empolamento pelo hidrogênio



Em torno de solda

Fonte: GENTIL, 2011, p.46

Os fatores mecânicos também podem contribuir para o aparecimento da corrosão, ou seja, quando o metal está sob tensão, sob fadiga, atrito, a região fica instável susceptível ao aparecimento da corrosão (GENTIL, 2011).

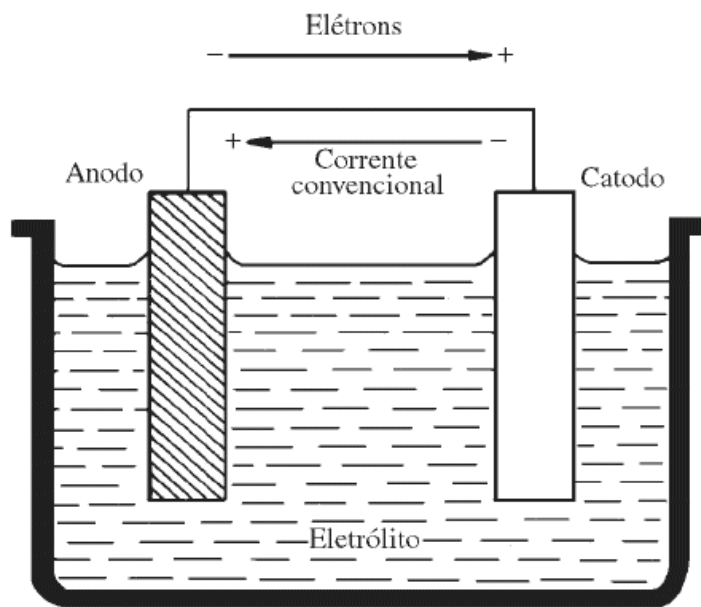
Segundo Gentil (2011) e também Callister e Rethwisch (2018) no capítulo 17, a atmosférica, o solo, microrganismos, água do mar, sais fundidos, são eletrólitos para a condução de íons e elétrons possibilitando a reação química de oxidação-redução, conseqüentemente a corrosão.

4.3. Pilha Galvânica

Uma pilha galvânica é formada por dois materiais metálicos de diferentes potenciais elétricos em contato através de um eletrólito conforme ilustrado na figura 2. De acordo com Gentil:

Quando dois materiais metálicos, com diferentes potenciais, estão em contato em presença de um eletrólito, ocorre uma diferença de potencial e a conseqüente transferência de elétrons. Tem-se então o tipo de corrosão chamado corrosão galvânica, que resulta do acoplamento de materiais metálicos dissimilares imersos em um eletrólito, causando uma transferência de carga elétrica de um para outro, por terem potenciais elétricos diferentes (GENTIL, 2011, p.85).

Figura 2 - Esquema de pilha eletroquímica

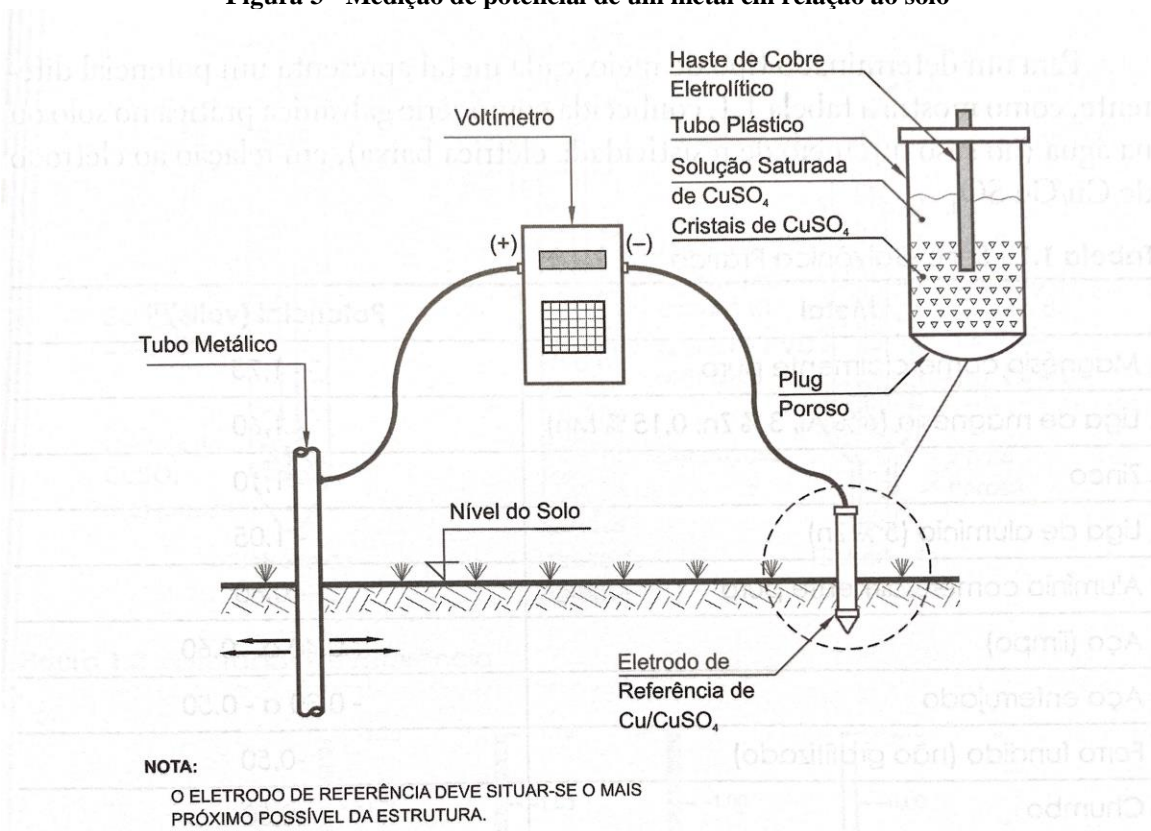


Fonte: GENTIL, 2011, p.34

4.4. Potencial Natural ou Potencial Eletroquímico

Para qualquer metal colocado em contato com o solo ou a água, sempre existirá uma diferença de potencial entre o metal e o meio denominado potencial natural ou potencial eletroquímico. Esta pode ser medida utilizando-se um multímetro e um eletrodo de referência conforme esquema da figura 3 (IEC, 2020).

Figura 3 - Medição de potencial de um metal em relação ao solo



Fonte: IEC, 2020, p.3

A leitura obtida no multímetro em volts depende do meio, no caso o solo, e o eletrodo de referência adotado. A tabela 1 apresenta valores de potencial natural ou eletroquímico de alguns metais no solo medidos em referência à um eletrodo de Cu/CuSO₄.

Tabela 1 - Potencial natural ou eletroquímico – Série galvânica prática

Metal	Potencial (volts)⁽¹⁾
Magnésio comercialmente puro	- 1,75
Liga de magnésio (6 % Al, 3 % Zn, 0,15 % Mn)	- 1,60
Zinco	- 1,10
Liga de alumínio (5 % Zn)	- 1,05
Alumínio comercialmente puro	- 0,80
Aço (limpo)	- 0,40 a - 0,60
Aço enferrujado	- 0,30 a - 0,50
Ferro fundido (não grafitizado)	-0,50
Chumbo	-0,50
Aço em concreto	-0,20
Cobre, bronze, latão	- 0,20
Ferro fundido com alto teor de silício	- 0,20
Titânio, carbono, grafite, coque	+ 0,30 a + 0,40

Nota: (1) Potenciais típicos normalmente observados em solos neutros e água com resistividade elétrica inferior a 3 000 ohm.cm, medidos em relação ao eletrodo de Cu/CuSO₄. Valores diferentes são encontrados em diferentes tipos de solos.

Fonte: IEC, 2020, p.3

4.5. Métodos de Proteção à Corrosão

De acordo com Gentil a morfologia ou aparência da corrosão ajuda entender a corrosão e definir o seu método ou medida de proteção adequada para combate ou eliminação da corrosão. “A caracterização segundo a morfologia auxilia bastante no esclarecimento do mecanismo e na aplicação de medidas adequadas de proteção” (GENTIL, 2011, p. 45).

Antes de propor a utilização de um material é necessário conhecer o meio em que o mesmo será submetido, todos os materiais são passíveis de sofrerem corrosão caso o meio seja suficientemente agressivo (FELIPE, MACIEL, MEDEIROS e SILVA, 2013).

De acordo com Felipe, Maciel, Medeiros e Silva (2013), de uma forma geral:

- [...] os processos corrosivos podem estar vinculados aos seguintes meios agressivos:
- Atmosfera (material particulado, umidade, gases: CO, CO₂, SO₂, H₂S, NO₂)

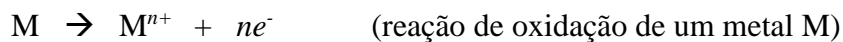
- Água (organismos dispersos, sólidos suspensos, chuva ácida, outros)
- Solo (acidez, porosidade)
- Produtos químicos (FELIPE, MACIEL, MEDEIROS e SILVA, 2013, p.750.).

Gentil (2011) observa que para diminuir ou eliminar a corrosão, principalmente a corrosão por formação de pilha galvânica, o trio anodo, catodo e meio (eletrólito) devem ser separados adotando-se medidas tais como:

- Uso de inibidores de corrosão;
- Isolamento elétrico dos materiais de potenciais diferentes;
- Aplicação de revestimentos protetores;
- Relação da área anódica/catódica maior do que um;
- Proteção catódica;
- Uso de materiais de potenciais próximos.

4.6. Proteção Catódica

Um dos meios mais eficazes para a prevenção da corrosão é a proteção catódica. De acordo com Callister e Rethwisch (2018), a proteção catódica supre a perda de elétrons de um metal quando este está sujeito a um meio corrosivo, ou eletrólito de corrosão. A reação abaixo mostra o sentido da reação de oxidação ou dissolução do material, o objetivo da proteção catódica é forçar a reação a seguir o sentido contrário, tornando o metal um cátodo que recebe elétrons, ou seja, o metal passa a ser reduzido e não oxidado.



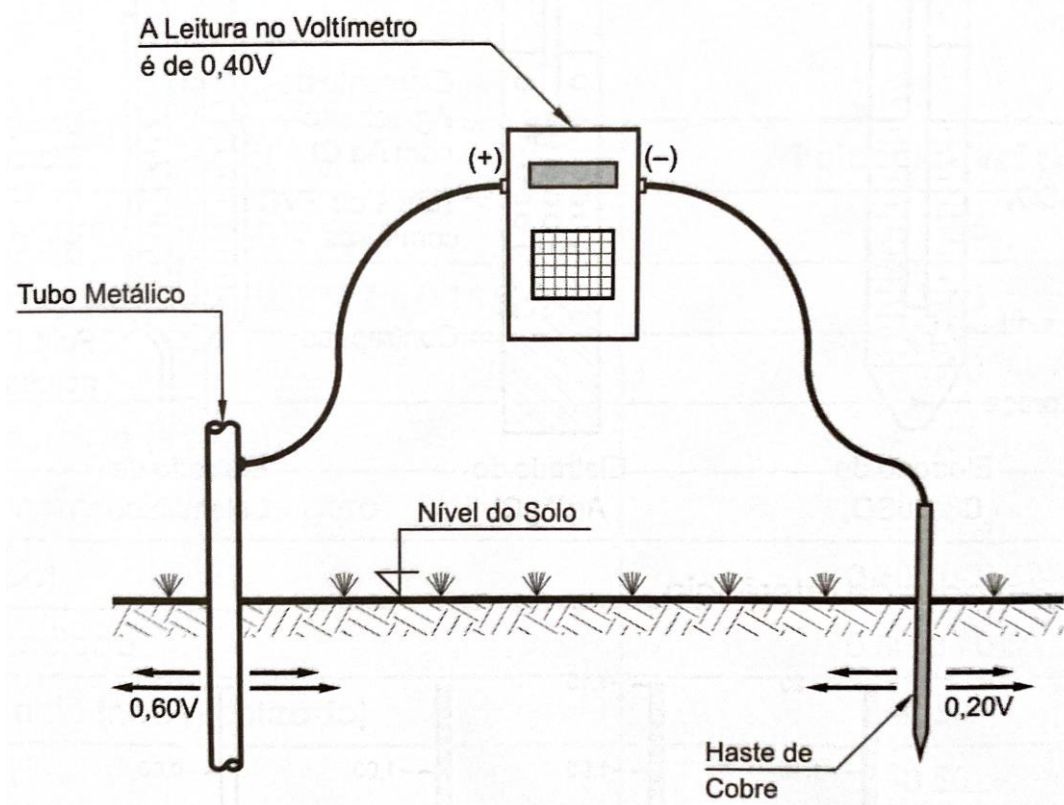
A proteção catódica pode ser obtida pela proteção catódica galvânica e a proteção catódica por corrente impressa ou forçada, estes dois métodos são baseados no mesmo princípio de funcionamento de injeção de corrente elétrica na estrutura através do eletrólito (CALISTER e RETHWISCH, 2018).

4.6.1. Proteção Catódica Galvânica

Neste processo o fluxo de corrente elétrica fornecido origina-se da diferença de potencial existente entre o metal a ser protegido e outro escolhido como anodo e que tem potencial mais negativo na tabela de potenciais. A figura 4 mostra a diferença de potencial medida entre um tubo de aço e o cobre. O valor de 0,60V está conformidade com a tabela 1 para o material aço (limpo).

Neste caso não ocorre a proteção catódica galvânica, pois o tubo de aço de potencial -0,60V é mais negativo que a haste de cobre de potencial -0,20V, o que favorece que o tubo ceda elétrons (oxidação) ao cobre (redução) (IEC, 2020).

Figura 4 - Medição de diferença de potencial entre dois metais diferentes, no solo



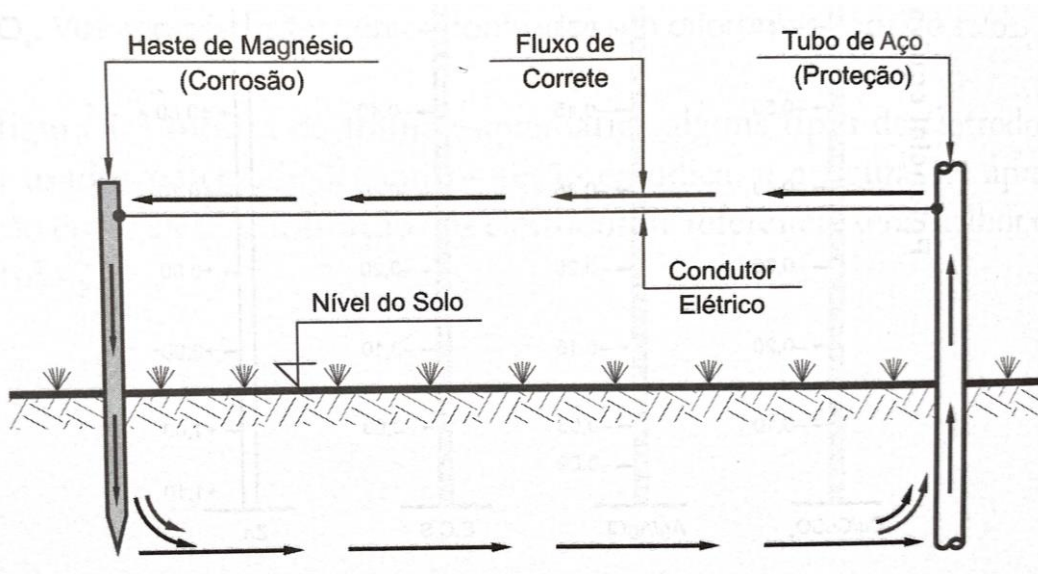
Fonte: IEC, 2020, p.4

Para que ocorra a proteção catódica galvânica o metal a ser protegido deve possuir o potencial galvânico maior que o metal de sacrifício, também chamado de anodo de sacrifício.

A figura 5 mostra uma haste de magnésio enterrada no solo, que conforme a tabela 1 da série galvânica prática, o material magnésio possui potencial -1,75V e o um tubo de aço também

enterrado no solo com potencial de $-0,60V$, o fluxo de elétrons real ocorre da haste de magnésio para o tubo de aço, ou seja, o tubo de aço está sempre recebendo elétrons tornando-o assim um catodo (IEC, 2020).

Figura 5 - Exemplo de pilha galvânica entre o aço e o magnésio



Fonte: IEC, 2020, p.6

A vida útil de um anodo de proteção catódica galvânica, expressão (4.2), pode ser calculada isolando a variável V (vida útil desejada) na expressão 4.1 abaixo que, de acordo com IEC (2020), determina a massa de anodo necessária para a proteção catódica galvânica para um determinado eletrodo de anodo sujeito a uma corrente de proteção I calculada pela expressão 4.3.

$$M = \frac{8760 VI}{CF} \quad (4.1)$$

$$V = \frac{0,85 MC}{8760 I} \quad (4.2)$$

Onde:

V = vida útil dos anodos, em anos;

M = massa total dos anodos, em kg;

C = capacidade de corrente do, em Ah/kg;

I = corrente necessária para a proteção, em A;

F = fator de utilização dos anodos (adimensional), normalmente adotado 0,85 para anodos convencionais;

8.760 = número de horas de um ano.

“A corrente necessária à proteção de determinada estrutura independe do tipo de sistema que se utiliza, seja galvânico ou por corrente impressa (IEC, 2020, p. 104)

$$I = A.Dc.F.(1 - E) \quad (4.3)$$

Onde:

I = corrente necessária, em mA;

A = área da estrutura a ser protegida, em m²;

Dc = densidade de corrente, em mA/ m²;

F = fator de correção da corrente devido à despolarização pela velocidade relativa estrutura/eletrólito, adimensional;

E = eficiência do revestimento.

4.6.2. Proteção Catódica por Corrente Impressa

A proteção catódica por corrente impressa tem o mesmo princípio da proteção catódica galvânica, ou seja, forçar o sentido contrário da reação de oxidação com a doação e elétrons ao metal a ser protegido.

De acordo com Gentil (2011), o fluxo de elétrons fornecido:

[...] origina-se da força eletromotriz (fem) de uma fonte geradora de corrente elétrica contínua, sendo largamente utilizados na prática os retificadores que, alimentados com corrente alternada, fornecem a corrente elétrica contínua necessária à proteção da estrutura metálica. Para a dispersão dessa corrente elétrica no eletrólito são utilizados anodos especiais, inertes, com características e aplicações que dependem do eletrólito onde são utilizados (GENTIL, 2011, p.289)

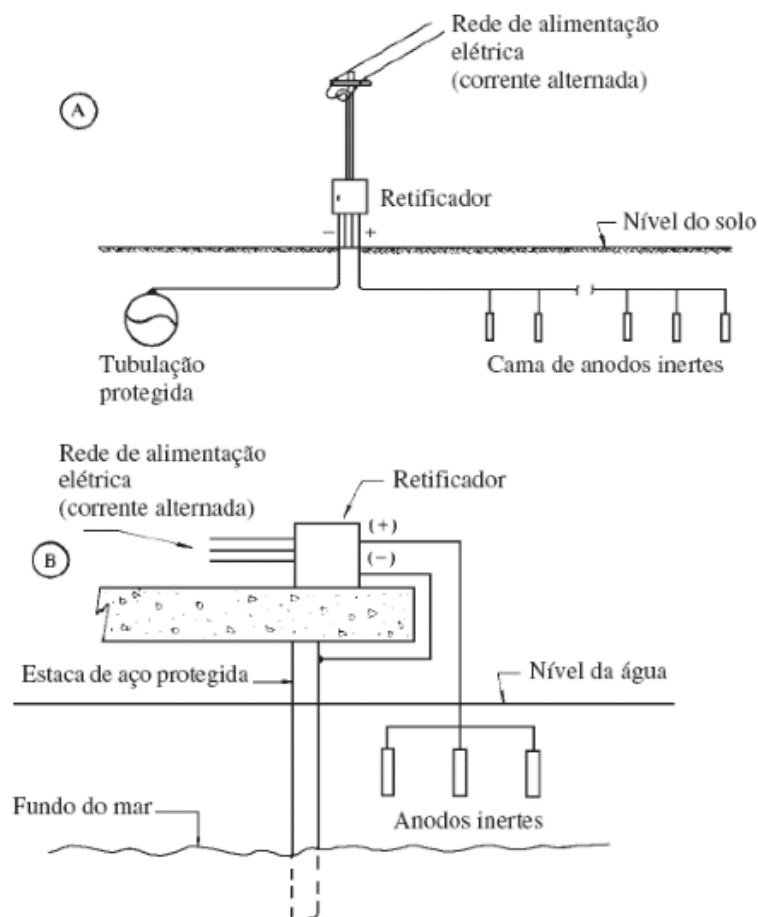
Gentil (2011) afirma que no método por corrente impressa, a grande vantagem é que a fonte geradora (retificador de corrente) poder ter a potência e a tensão de saída necessária em

função da resistividade elétrica do eletrólito, ou seja, se aplica à proteção de estruturas em contato com eletrólitos de baixa, média, alta e altíssima resistividade elétrica.

Normalmente este tipo de proteção é muito aplicado em proteção de tubulações enterradas, pois as tubulações estão imersas no solo (eletrólito) de baixa resistividade elétrica (3.000 a 10.000 $\Omega \cdot \text{cm}$).

A figura 6 mostra o sistema de proteção catódica por corrente impressa e seus componentes. O sistema é composto de uma fonte (retificador), catodo (estrutura a ser protegida), anodos e eletrólito (solo e água).

Figura 6 - Proteção catódica por corrente impressa para uma tubulação enterrada A e para uma estaca de píer de atracação de navio B



Fonte: GENTIL, 2011, p.291

Existe uma diferença entre os anodos dos dois tipos de proteção catódica, na proteção catódica galvânica o anodo, chamado anodo de sacrifício, sofre corrosão acentuada sendo

necessária a substituição do mesmo para a manutenção da proteção. Na proteção catódica por corrente impressa o anodo é dito inerte, pois seu desgaste é lento e de acordo com Gentil (2011) sua vida útil pode ser calculada pela expressão abaixo:

$$V = \frac{0,85 M}{DI} \quad (4.4)$$

Onde:

V = vida útil dos anodos, em anos;

M = massa total dos anodos, em kg;

D = desgaste esperado do anodo, em kg/ A·ano;

I = corrente injetada pelo retificador, em A;

0,85 = fator de utilização dos anodos.

4.6.3. Proteção Catódica Galvânica x por Corrente Impressa

De acordo com o IEC (2020), os sistemas de proteção catódica galvânicos apresentam as seguintes características:

- São indicados para aplicação em meios com eletrólito de baixa resistividade o que limita o eletrólito, ou seja, não é indicado para qualquer situação.
- Mais indicado para pequenas instalações;
- Não possibilitam controle da corrente de corrosão;
- Uma vez instalados, o sistema vai ser interrompido somente quando o anodo estiver todo consumido;
- Necessita de substituição periódica do eletrodo anódico;
- São muito utilizados para proteção de plataformas de petróleo, tubulações submersas e outras estruturas no mar;

Já os sistemas de proteção catódica por corrente impressa, a IEC (2020) caracteriza como sendo:

- Sistemas indicados para qualquer eletrólito, visto que a corrente de corrosão pode ser controlada;
- São indicados para instalações de qualquer porte;

- São sujeitos à interrupção, pois necessita de um sistema eletrônico (fonte externa) para a geração da corrente;
- Necessitam de inspeções e manutenções para manter o sistema funcionando;

Inicialmente o valor de instalação dos sistemas de proteção galvânica por corrente impressa é maior que os sistemas de proteção galvânica, porém ao longo do tempo este se torna mais viável pela vantagem de controle da corrente de corrosão e pelo fato dos eletrodos anódicos serem inertes com vida útil maior.

A proteção galvânica também é muito utilizada principalmente para eletrólitos de baixa resistividade elétrica, como a água do mar.

4.7. O Zinco (Zn)

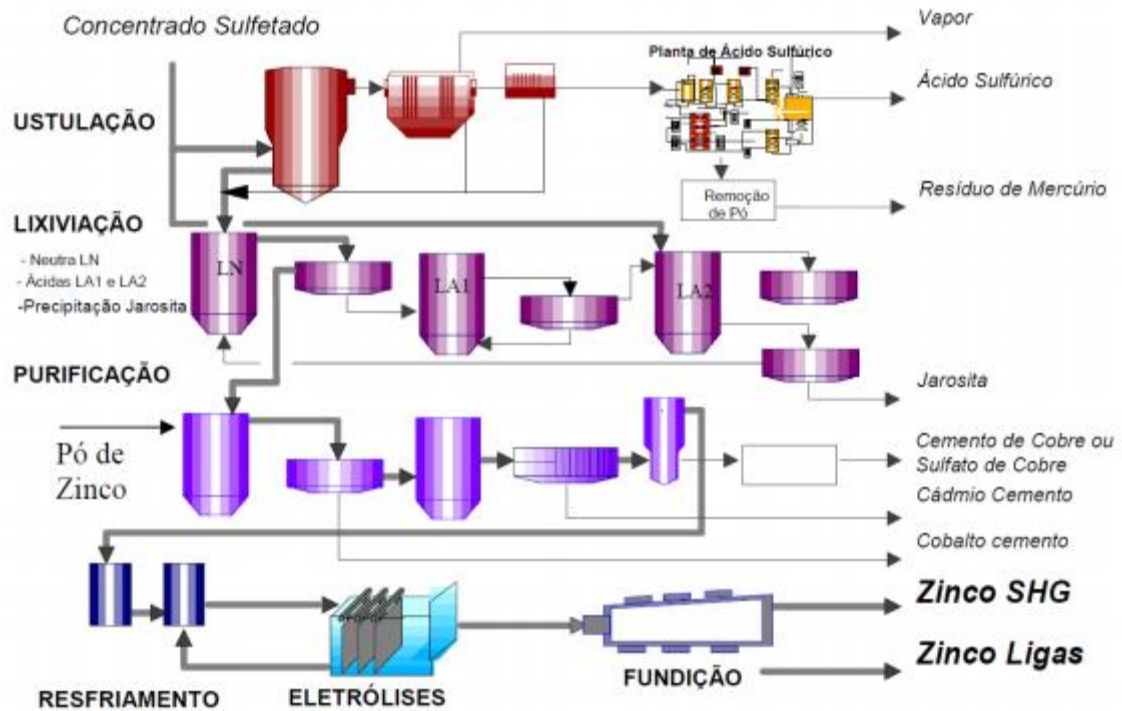
O Zinco (Zn) é o elemento químico de número atômico 30, um metal de transição do grupo 12 da Tabela Periódica. Em sua forma metálica, o zinco apresenta um brilho cinza prateado e é especialmente apreciado por sua alta resistência à corrosão (ICZ, 2021).

Um dos principais processos de produção de Zinco é a eletro-obtenção como fase final de uma extração pirometalúrgica ou hidrometalúrgica.

Existem várias rotas de processo para obtenção do Zinco. O Processo Roast-Leach-Electrowin (RLE) tem como principais etapas a ustulação, lixiviação e eletrólise, para a extração do zinco. Por conta disso, também é conhecido como "processo eletrolítico" (SALES, 2020).

A figura 7 ilustra o fluxograma simplificado do processo RLE com suas principais etapas de processo para a obtenção do Zinco e suas ligas. A etapa de ustulação oxida o sulfeto de Zinco (ZnS) transformando em óxido de Zinco (ZnO), liberando SO₂ que pode ser utilizado para produção de ácido sulfúrico. Na etapa de lixiviação o ZnO é atacado com ácido sulfúrico e como resultado é gerado o sulfato de Zinco (ZnSO₄) que é submetido a etapa da eletro-obtenção para obtenção do Zinco metálico por eletrólise (SALES, 2020).

Figura 7 - Fluxograma simplificado do processo RLE



Fonte: SALES, 2020

Dentre várias aplicações, o Zinco é utilizado como eletrodo de sacrifício na proteção catódica em barcos e navios. Os ânodos de zinco para embarcações controla a corrosão de uma superfície metálica, tornando-a o cátodo de uma célula eletroquímica. O metal a ser protegido, casco da embarcação, é conectado à um “metal de sacrifício”, anodo de zinco, mais facilmente corrosível para atuar como o ânodo. O metal de sacrifício então é corroído no lugar do metal a ser protegido.

A figura 8 ilustra o Zinco como eletrodo de sacrifício no casco de um navio, a figura 8.a mostra a disposição dos eletrodos de Zinco no casco, que quando o navio está em navegação o eletrodo fica em contato com a água. A figura 8.b detalha a instalação de um eletrodo de Zinco.

Figura 8 - Proteção catódica por anodo de zinco em casco de navio: (a) vista inferior do navio em dique seco; (b) fixação do anodo de zinco no casco do navio



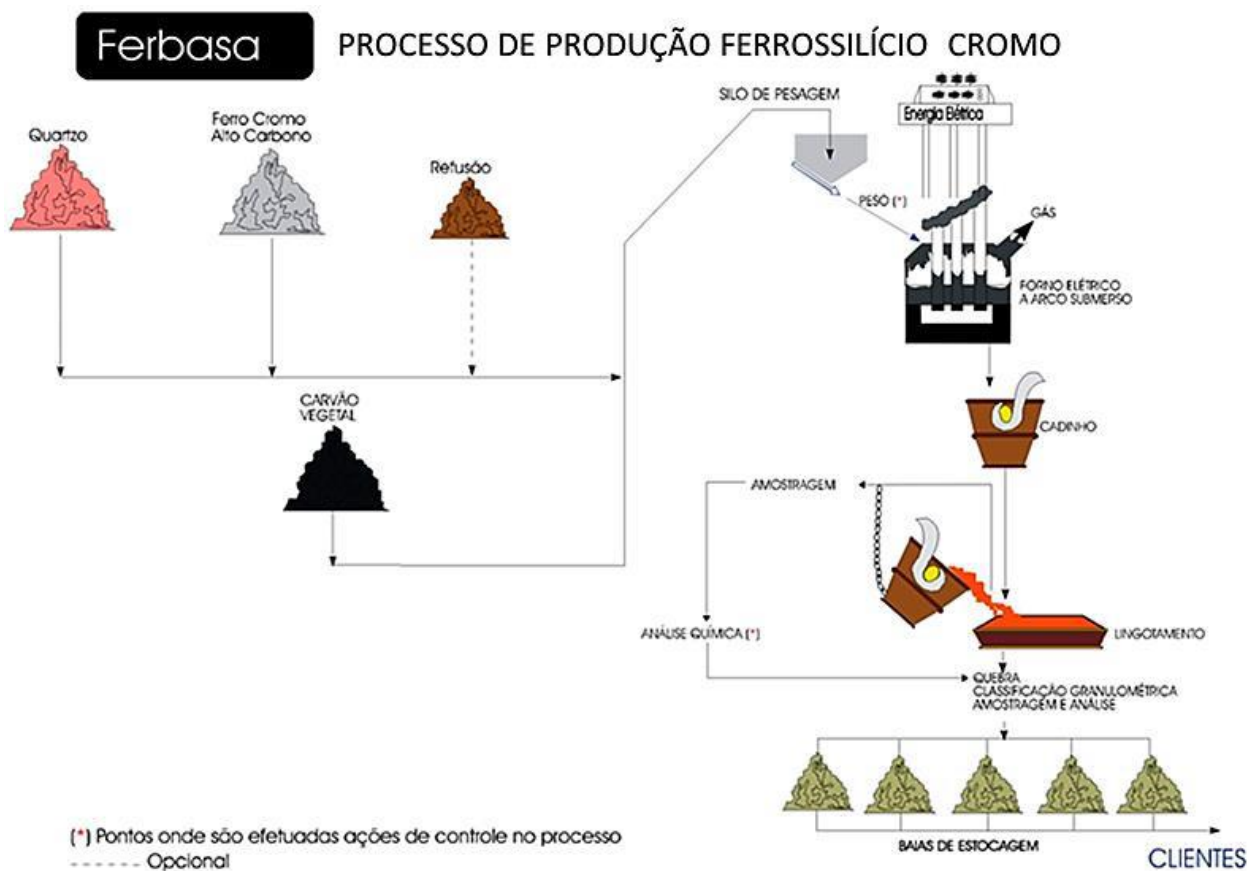
Fonte: MERÇON, GUIMARAES e MAINIER, 2004, p.14

4.8. A liga de Ferro Silício Cromo (FeSiCr)

A liga de FeSiCr (FERRO SILÍCIO CROMO) é gerada a partir da fusão, em forno elétrico de arco submerso, do FeCrAC (FERRO CROMO ALTO CARBONO), que tem como principal função o fornecimento dos elementos Cr e Fe, com o Si (SILÍCIO) obtido pela redução do Quartzo (SiO_2).

A figura 9 mostra o processo simplificado de produção do FeSiCr. O Ferro Cromo Alto Carbono (FeCrAC), o carvão e o quartzo são adicionados em um forno de redução a arco submerso, o redutor entra em contato com o quartzo reagindo com o oxigênio dos elementos SiO_2 , obtendo o Si. O Cr e o Fe, fornecidos pelo FeCrAC, fundem no interior do forno, juntando-se ao Si obtido pela reação, formando a liga de FeSiCr (FERBASA, 2022)

Figura 9 - Processo de Produção Ferrossilício Cromo



Fonte: FERBASA, acesso 25/10/2022

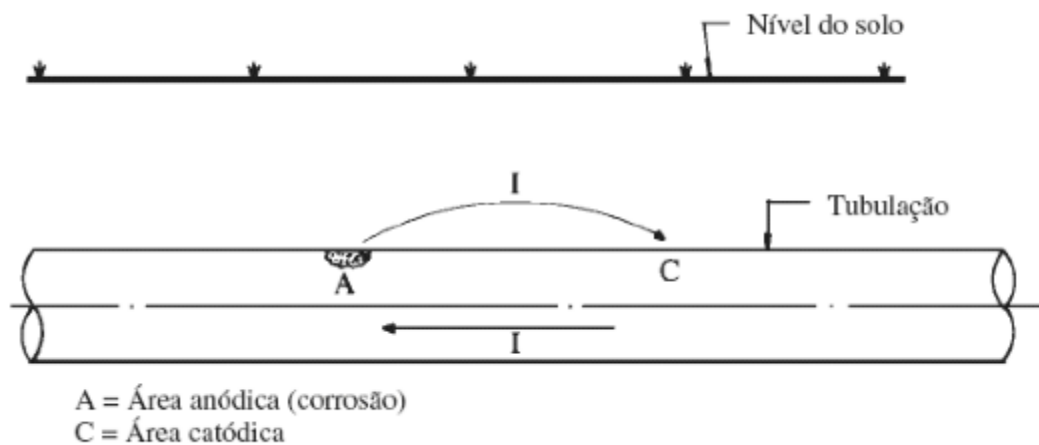
5. DESENVOLVIMENTO

5.1. Corrosão em tubos de aço carbono enterrados

De acordo com Gentil (2011), o processo corrosivo de uma estrutura metálica enterrada ou submersa se caracteriza sempre pelo aparecimento de áreas anódicas e catódicas na superfície do material metálico. Esse aparecimento de áreas anódicas e catódicas gera um fluxo de corrente elétrica no sentido convencional, das áreas anódicas para as áreas catódicas através do eletrólito, sendo o retorno dessa corrente elétrica pelo contato metálico entre essas regiões, conforme ilustrado na figura 10.

Gentil (2011) define que a causa dessa corrente é devido às diferenças de potenciais ao longo de uma tubulação de aço ou de uma chapa metálica mergulhada em um eletrólito, como o solo ou a água.

Figura 10 - Áreas anódicas e catódicas de uma tubulação metálica enterrada



Fonte: GENTIL,2011, p. 286

As ocorrências de áreas de potenciais diferentes “tem sua explicação nas variações de composição química do metal, na presença de inclusões não metálicas, nas tensões internas diferentes causadas pelos processos de conformação e soldagem do material metálico etc” (GENTIL, 2011, p.286)

Para que o mecanismo de corrosão em tubos enterrados seja reduzido e/ou controlado, devem ser aplicadas técnicas de proteção contra corrosão. Além da proteção por isolamento através de uma camada protetora e isolante revestindo os tubos, a proteção catódica é utilizada para garantir o controle das correntes geradas por diferença de potencial nas superfícies dos tubos.

Para tubulações de aço enterradas em trechos pequenos, eletrólitos com resistividade baixa e constante, baixa interferências ou ausência de correntes externas, a proteção catódica galvânica com a utilização de eletrodo anódico de zinco é recomendada pelo baixo custo de instalação e manutenção.

O projeto de proteção catódica deve levar em consideração as características da tubulação de aço a ser protegida, o eletrólito onde a mesma está submetida, as interferências eletromagnéticas e principalmente os custos de instalação e manutenção do sistema de proteção (IEC, 2020).

A vida útil dos eletrodos anódicos para a proteção das estruturas é calculada de forma diferente para os dois sistemas de proteção catódica galvânica e por corrente impressa. Os eletrodos dos sistemas de proteção catódica por corrente impressa são considerados inertes e sua vida útil é calculada conforme expressão 4.4. Para os sistemas de proteção catódica galvânica o cálculo da vida útil de um eletrodo anódico de proteção galvânica é calculado utilizando a expressão 4.2.

5.2. Vida Útil do eletrodo de Zinco X eletrodo de FeSiCr

O cálculo da vida útil dos eletrodos dos sistemas de proteção catódica é um parâmetro que auxilia na definição da escolha do sistema de proteção galvânico ou por corrente impressa para a proteção das tubulações de aço enterradas.

Para as mesmas características de eletrólito pode-se comparar a vida útil dos eletrodos anódicos de zinco (Zn) e de ferro silício cromo (FeSiCr).

De acordo com a IEC (2020) os eletrodos anódicos de FeSiCr possuem alto desempenho na proteção catódica por corrente impressa de tubulões enterradas.

Considerando uma tubulação de aço carbono com diâmetro \varnothing 200 mm, enterrada no solo com proteção de superfície por isolamento com fita polimérica aplicada a frio em uma única

camada. Pode-se calcular a vida útil dos eletrodos de Zn e FeSiCr aplicados em proteções catódicas galvânicas e por corrente impressa para a proteção desta tubulação de aço, conforme abaixo.

Considerando:

- L - Comprimento do tubo em metros, variando de 1 a 100 m;
- A - Área da superfície a ser protegida do tubo (perímetro x comprimento), variando com o comprimento;
- M - Massa do eletrodo = 10 Kg;
- I - Corrente necessária à proteção, calculada na expressão 4.3;
- $D_{(FeSiCr)}$ - Desgaste do eletrodo de FeSiCr = 0,35 Kg/A.ano, conforme tabela 8.2 (IEC, 2020, p.159);
- $D_{(Zn)}$ - Desgaste do eletrodo de Zinco = 10,7 Kg/A.ano, conforme tabela 10.1 (IEC, 2020, p.195);
- D_c - Densidade de corrente para tubo de aço carbono, considerando resistividade de solo 1000 ohm.cm no gráfico de variação de densidade de corrente pela variação da resistividade do solo = 0,03 mA/m², conforme figura 5.1 (IEC, 2020, p.106);
- C_{Zn} - Capacidade de corrente do Zn = 740 Ah/Kg, conforme tabela 8.1 (IEC, 2020, p.150);
- F - Fator de correção de corrente = 1, devido a tubulação estar enterrada e estática, conforme figura 5.2 (IEC, 2020, p.107);
- E - Eficiência do revestimento = 40%, tubo enterrado protegido com fita polimérica aplica a frio, conforme tabela 3.2 (IEC, 2020, p.72)
- V_{ci} - Vida útil do eletrodo por corrente impressa, calculada na expressão 4.2 em anos;
- V_g - Vida útil do eletrodo galvânico, calculada na expressão 4.4 em anos.

Pode-se obter a vida útil do eletrodo de Zn para o sistema de proteção catódica galvânica e a vida útil do eletrodo de FeSiCr para o sistema de proteção catódica por corrente impressa, conforme tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Vida útil eletrodos de Zn e FeSiCr

L	A	M	I	D (FeSiCr)	D (Zn)	Dc	C do Zn	Vci do FeSiCr	Vci do Zn	Vg do Zinco
1	0,628	10	0,0113	0,35	10,7	0,03	740	2148,42	70,28	63,52
2	1,256	10	0,02261	0,35	10,7	0,03	740	1074,21	35,14	31,76
3	1,884	10	0,03391	0,35	10,7	0,03	740	716,14	23,43	21,17
4	2,512	10	0,04522	0,35	10,7	0,03	740	537,10	17,57	15,88
5	3,14	10	0,05652	0,35	10,7	0,03	740	429,68	14,06	12,70
10	6,28	10	0,11304	0,35	10,7	0,03	740	214,84	7,03	6,35
20	12,56	10	0,22608	0,35	10,7	0,03	740	107,42	3,51	3,18
30	18,84	10	0,33912	0,35	10,7	0,03	740	71,61	2,34	2,12
40	25,12	10	0,45216	0,35	10,7	0,03	740	53,71	1,76	1,59
50	31,4	10	0,5652	0,35	10,7	0,03	740	42,97	1,41	1,27
60	37,68	10	0,67824	0,35	10,7	0,03	740	35,81	1,17	1,06
70	43,96	10	0,79128	0,35	10,7	0,03	740	30,69	1,00	0,91
80	50,24	10	0,90432	0,35	10,7	0,03	740	26,86	0,88	0,79
90	56,52	10	1,01736	0,35	10,7	0,03	740	23,87	0,78	0,71
100	62,8	10	1,1304	0,35	10,7	0,03	740	21,48	0,70	0,64

Fonte: Pelo autor

6. CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho é apresentado nos itens 5.1 e com os resultados do item 5.2, pode se concluir que o eletrodo de sacrifício utilizando o ferro-silício-cromo é mais viável para a proteção catódica por corrente impressa para tubos de aço carbono enterrados em solo, devido o mesmo ser inerte e o método de proteção catódica por corrente impressa possibilitar o controle da corrente de proteção que altera ao logo de todo o tubo enterrado.

O objetivo específico a) deste trabalho é apresentado no item 4.6.3 e pode-se concluir que ambos os métodos de proteção catódica galvânica e por corrente impressa são aplicáveis e sua viabilidade depende de um projeto de proteção do metal, que leva em consideração várias características e fatores como dimensões e resistividade do meio.

O objetivo específico b) deste trabalho é apresentado no item 5.2, que de acordo com os resultados dos cálculos de vida útil dos eletrodos anódicos apresentados na tabela 2 da página 29, pode-se concluir que o eletrodo anódico de Zn mesmo apresentando vida útil maior no método de proteção catódica por corrente impressa comparado ao mesmo no método de proteção galvânica, porém a vida útil do eletrodo de Zn não se compara à vida útil do eletrodo de proteção catódica inerte de FeSiCr.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho sugere algumas avaliações para próximos estudos, tais como:

- 1) Avaliação da influência da variação do eletrólito no desgaste dos eletrodos;
- 2) Avaliação do eletrodo de Zn para proteção galvânica naval pelo fato da instalação simples em cascos de navios sem a necessidade de um sistema de proteção catódica por corrente impressa;
- 3) Análise de viabilidade técnica/econômica identificando até que tamanho de área e característica de eletrólitos e metal a ser protegido o Zn é viável para a proteção catódica;
- 4) Confirmação do desgaste do zinco Zn em eletrólitos diferentes, tais como solução de NaCl, solução de H₂SO₄ diluído, água oxigenada e argila;
- 5) Estudo das características físicas, químicas, mecânicas e eletromagnéticas dos eletrodos inertes para proteção catódica, para tentar entender o porquê da palavra inerte.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CALLISTER, W. D. Jr; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- (2) FERBASA. Metalurgia/Nossos Produtos: **Ferrosilício Cromo (FeSiCr)**. Disponível em: http://www.ferbasa.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=56201. Acesso em: 25 out. 2022.
- (3) FELIPE, M. B. M. C.; MACIEL, M. A. M.; MEDEIROS, SILVA, D. R. Aspectos Gerais Sobre Corrosão e Inibidores Vegetais. **Revista Virtual de Química**, p 746-758. Data de publicação na Web: 31 de ago. de 2013
- (4) GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- (5) ICZ-Instituto de Metais Não Ferrosos. **Zinco**. Disponível em: <http://www.icz.org.br/zinco.php>. Acesso em: 15 mai. 2021.
- (6) IEC, Instalações e Engenharia de Corrosão LTDA. **Sistemas de Proteção Catódica**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2020.
- (7) IEC. **Proteção Catódica: Anodos de Ferro-Silício-Cromo**. Disponível em: <https://www.iecengenharia.com.br/produto/anodos-de-fe-si-cr/>. Acesso em: 25 out. 2022.
- (8) MERÇON, F.; GUIMARAES, P. I. C.; MAINIER, F. B. Corrosão: Em Exemplo Usual de Fenômeno Químico. **Química Nova na Escola**, n. 19, p 11-15, 2004.
- (9) MILES, M. B.; HUBERMAN, A. M. **Qualitative data analysis**. Thousand Oaks: Sage Publications, Inc. 1994
- (10) SALES, F. A. **Efeito da troca térmica sobre o processo de ustulação para produção de zinco metálico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG. Paraíba, 2020.