

C E T E S B

PROJETO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO
CATÓDICA PARA TUBULAÇÕES
- Procedimento -

P 4 . 1 1 0

<u>SUMÁRIO</u>	<u>Página</u>
1 Objetivo.....	1
2 Referências.....	1
3 Definições.....	2
4 Condições Gerais.....	2
5 Condições Específicas.....	5
Anexo A.....	13
Anexo B.....	15

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma fixa as condições exigíveis para o projeto de sistemas de proteção catódica de tubulações de aço.

1.2 Aplica-se à tubulações de aço eletricamente contínuas, enterradas ou submersas utilizadas em saneamento básico.

1.3 Esta Norma, pode também, fornecer subsídios para a proteção catódica de outras estruturas metálicas enterradas ou submersas.

2 REFERÊNCIAS

Na aplicação desta Norma poderá ser necessário consultar às seguintes normas:

a) da ABNT:

- NB-3 - Execução de Instalações Elétricas à Baixa Tensão;
- PB-46 - Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica;
- P-CB-10 - Ligas de Zinco.

b) da CETESB:

- L6.200 - Levantamento de Dados sobre Agressividade de Solos à Tubulações - Requisitos Gerais e Amostragem

3 DEFINIÇÕES

Para efeito desta Norma são adotadas as seguintes definições.

3.1 Anodo

Eletrodo no qual ocorre a oxidação e onde a corrente de íons positivos passa para o eletrólito (solo e/ou água).

3.2 Catodo

Eletrodo onde ocorre redução. Recebe corrente na forma de íons positivos provenientes do eletrólito.

3.3 Eletrodo

Material condutor elétrico imerso num eletrólito.

3.4 Potencial natural

Potencial tubulação/eletrólito não estando a tubulação sujeita a correntes elétricas externas.

3.5 Potencial tubulação/eletrólito

Valor da diferença de potencial entre a tubulação e um eletrodo de referência, colocado no eletrólito onde se encontra a tubulação.

3.6 Resistividade aparente

Característica associada à resistência imposta pelo eletrólito à passagem de uma corrente elétrica.

3.7 Trecho crítico (da tubulação)

Extensão ou região da tubulação que requer uma atenção especial de proteção catódica para que seja impedida a sua danificação.

4 CONDIÇÕES GERAIS

4.1 Informações básicas

O sistema de proteção catódica deve ser projetado em função das seguintes informações, referidas de 4.1.1 a 4.1.4.

4.1.1 Projeto completo da tubulação a ser protegida.

4.1.2 Perfil da eletro resistividade do eletrólito ao longo do traçado da tubulação.

4.1.3 Informações técnicas de outras estruturas metálicas situadas nas adjacências ou que cruzam a tubulação a ser protegida, incluindo:

- a) especificação do material da estrutura;
- b) tipo de revestimento da estrutura;
- c) o projeto completo e os dados operacionais da proteção catódica das estruturas, se houver.

4.1.4 Fontes de interferência tais como: ferrovias eletrificadas, linhas de transmissão de energia elétrica, indústrias que utilizam equipamentos de corrente contínua.

4.2 Análise da necessidade de proteção

Antes de se optar por um sistema de proteção catódica, deverão ser analisados aspectos técnico-econômicos para se verificar a necessidade dessa proteção. Os critérios mínimos a serem considerados devem ser:

4.2.1 Resistividade do solo

4.2.1.1 Em geral, solos de baixa resistividade são corrosivos.

4.2.1.2 Do ponto de vista exclusivo da resistividade sugere-se a classificação a seguir:

Resistividade aparente (ohm x cm)	Recomendações quanto à necessidade de proteção
até 4.000	SIM
> 4.000	CONSIDERAR <u>OUTROS FATORES</u>

NOTA:

- 1) A resistividade do eletrólito deve ser determinada segundo o método de Wenner.
- 2) A Norma CETESB L6.200 indica o método para determinação da resistividade do solo.

4.2.2 Correntes de interferência

4.2.2.1 Quando for constatada a existência de correntes de interferência é necessária a proteção.

4.2.2.2 No caso de solos deve-se utilizar o método previsto na Norma CETESB L6.200 para constatação dessas correntes.

4.3 Níveis de proteção

A proteção catódica pode ser completa e incompleta.

4.3.1 Proteção completa

Quando o potencial tubulação/eletrólito de todos os pontos da tubulação estiver abaixo de -0,85 volts (Valor algébrico).

4.3.2 Proteção incompleta

Quando o potencial natural de todos os pontos da tubulação é deslocado de 0,3 volts no sentido previsto sem atingir o valor de -0,85 volts

NOTA: Os valores do potencial (item 4.3) referem-se à semi-célula de Cu/CuSO₄.

4.4 Critérios de proteção

4.4.1 Dependendo de fatores econômicos, de segurança, de riscos assumidos para a ocorrência de furos na tubulação, e mesmo do local da instalação desta, a proteção catódica poderá ser empregada segundo os critérios:

4.4.1.1 Proteção total: Quando todos os pontos da tubulação recebem proteção completa ou incompleta.

4.4.1.2 Proteção parcial: Quando apenas trechos críticos da tubulação recebem proteção completa ou incompleta.

4.5 Tipos de sistemas de proteção

4.5.1 Existem dois sistemas básicos para proteção de tubulações:

- a) por corrente galvânica;
- b) por corrente impressa.

4.5.1.1 Proteção por corrente galvânica: São utilizados somente anodos de metais mais eletro negativos do que o da tubulação a proteger.

4.5.1.2 Proteção por corrente impressa: São utilizados anodos e fontes externas.

4.5.2 O Anexo B fornece subsídios para a escolha dos sistema a ser adotado.

4.6 Tipos de anodos

4.6.1 Para corrente impressa são usados:

- a) grafite;
- b) ligas de chumbo, antimônio e prata;
- c) ligas de ferro-silício;
- d) sucata de ferro ou aço.

4.6.2 Para corrente galvânica são usados:

- a) ligas de zinco;
- b) ligas de magnésio;
- c) ligas de alumínio.

NOTA: A Tabela 1, nos dá a composição dessas ligas.

TABELA 1 - Composição, em peso, de anodos galvânicos

ELEMENTO	LIGA DE Zn %	LIGA DE Al %	LIGA DE Mg %
Zn	balanço	5,0 a 7,0	2,0 a 5,0
Al	0,1 a 0,5	balanço	5,0 a 6,0
Mg	-	-	balanço
Pb	0,006 máx.	-	0,05 máx.
Fe	0,005 máx.	0,15 máx.	0,003 máx.
Cu	0,005 máx.	0,01 máx.	0,02 máx.
Cd	0,05 a 0,15	-	-
Sn	-	0,10 a 0,30	-
B	-	0,02 a 0,05	-
Si	0,125	0,20 máx.	0,10 máx.
Ni	-	0,01 máx.	0,003 máx.

5 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS5.1 Densidade de corrente necessária à proteção

5.1.1 A densidade de corrente necessária à proteção do aço nú enterrado ou submerso é função das características físico-químicas de solo, notadamente da resistividade e do coeficiente de despolarização.

5.1.2 Em tubulações já assentadas, a densidade de corrente deve ser determinada por ensaios de campo, com auxílio de geradores de corrente contínua, aterramentos provisórios e instrumentos de medição.

5.1.3 No caso em que a tubulação não tiver ainda sido assentada ou forem impraticáveis os ensaios de campo, a densidade de corrente é estimada por comparação com outras tubulações que estejam sob proteção catódica na mesma região, ou empiricamente.

5.1.4 Pode ser utilizada a fórmula empírica abaixo para a avaliação da densidade de corrente necessária à proteção catódica para potencial tubo / eletrolito igual a $-0,85V$ (Cu/CuSO₄).

$$\sigma = 78 \cdot 1,3^{(2-\ln\rho)}$$

Onde:

σ = densidade de corrente em mA/m²
 ρ = resistividade do solo em $\Omega \cdot \text{cm}$

5.2 Eficiência do revestimento

5.2.1 Os revestimentos podem apresentar trincas, porosidades, e outras falhas, tanto quando novos como também quando no decorrer do tempo.

5.2.2 Adotam-se geralmente, os seguintes valores para a eficiência dos revestimentos aplicados e inspecionados corretamente:

- a) proteção catódica por anodos de sacrifício $\epsilon = 0,95$;
- b) proteção catódica por corrente impressa $\epsilon = 0,90$.

5.2.3 Na falta de informações sobre a qualidade do revestimento a sua eficiência deve ser determinada por ensaios de campo com o auxílio dos equipamentos descritos no item 5.1.2.

5.3 Extensão da tubulação que pode ser protegida por um leito de anodos

5.3.1 A extensão máxima, à partir do ponto de drenagem de corrente da tubulação para o leito de anodos, que pode ser protegida catodicamente por este leito de anodos é dada pela relação:

$$L_m = p \sqrt{\frac{E}{\sigma (1-\epsilon)}}$$

Onde

L_m = extensão máxima, em m
 p = fator que depende de potencial mínimo admitido na tubulação
 E = espessura da parede dos tubos, em m

5.3.2 Partindo-se do princípio de que, na proteção por anodos de sacrifício o potencial mínimo atingido pela tubulação é aquele dos anodos e, na proteção por corrente impressa o potencial mínimo permitido na tubulação é -2,5V em relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre, tem-se os seguintes valores para o fator p:

anodo	p
zinco	18231
alumínio	18231
magnésio	49012
ferro-silício	76283
grafite	76283

5.4 Intensidade da corrente necessária à proteção

5.4.1 A intensidade da corrente necessária à proteção catódica de um trecho da tubulação é dada pela relação:

$$I_p = \frac{S\sigma(1-\varepsilon)}{1000}$$

Onde:

- I_p = intensidade de corrente de proteção, em A
- S = área do trecho a proteger, em m^2
- σ = densidade de corrente em mA/m^2
- ε = eficiência de revestimento.

5.5 Demanda de corrente

5.5.1 Nas regiões da tubulação onde o potencial é inferior a -0,85V ($Cu/CuSO_4$), a densidade de corrente será superior àquela calculada segundo o item 5.1.4, fazendo com que a demanda de corrente do leito de anodos seja superior a intensidade da corrente de proteção.

5.5.2 A demanda de corrente do leito de anodos, para a proteção de um trecho de extensão L, medida a partir do ponto de drenagem, pode ser dada pela relação:

$$I = QD \sqrt{E\sigma(1-\varepsilon)} \left(1 - e^{(-10^{-5} L \sqrt{\frac{2\sigma(1-\varepsilon)}{E}})} \right)$$

onde:

- I = demanda de corrente, em A
- Q = fator que depende do potencial mínimo admitido na tubulação
- D = diâmetro da tubulação, em m
- E = espessura da parede dos tubos, em m
- σ = densidade de corrente, em mA/m^2
- ε = eficiência do revestimento
- e = 2,71828
- L = extensão da tubulação, em m.

5.5.3 Partindo-se do princípio citado no item 5.3.2 tem-se os seguintes valores pa

<u>anodo</u>	<u>Q</u>
zinco	288
alumínio	288
magnésio	445
ferro-silício	654,5
grafite	654,5

NOTA: $l > l_p$

5.6 Massa necessária de anodos

5.6.1 A massa mínima de anodos que deverá ser utilizada em cada instalação de proteção catódica é dada pela relação:

$$m = Klv$$

Onde:

- m = massa mínima de anodos, em kg
- K = fator que depende do material do anodo
- l = demanda de corrente do leito de anodos, em A
- v = vida útil dos anodos, em anos.

5.6.2 Os valores do fator K são os seguintes:

<u>anodo</u>	<u>K</u>
zinco	13,79
alumínio	5,56 a 6,25 (dependendo da liga)
magnésio	9,37
ferro-silício	0,5
grafite	0,47

5.7 Número mínimo de anodos

O número mínimo de anodos que deverá ser utilizado em uma instalação de proteção catódica é o maior dos obtidos pelas relações

$$N_m = \frac{m}{m_a} \quad \text{ou} \quad N_m = \frac{l}{c}$$

Onde:

- N_m = número mínimo de anodos
- m = massa mínima de anodos, em kg
- l = demanda de corrente do leito de anodos, em A
- m_a = massa individual do anodo, em kg
- c = capacidade de liberação de corrente de cada anodo, em A.

NOTA: O fabricante de anodos deve fornecer e garantir a capacidade de liberação de corrente de seus produtos.

5.8 Resistência do leito de anodos

5.8.1 A resistência do aterramento de um leito de anodos é dada pelas relações:

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

$$R_a = R_H = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L^2 + 4L \sqrt{S^2 + L^2}}{DS} + \frac{S}{L} - \frac{\sqrt{S^2 + L^2}}{L} - 1 \right)$$

$$R_a = R_N = \frac{1}{N} \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{D} - 1 + \frac{2L}{a} \ln 0,656 N \right)$$

Onde:

- R_a = resistência do leito de anodos, em Ω
 R_v = resistência de um só anodo vertical, em Ω
 R_H = resistência de um só anodo horizontal, em Ω
 R_N = resistência de N anodos verticais ligados em paralelo, em Ω
 L = comprimento do anodo, em cm
 D = diâmetro do anodo, em cm
 ρ = resistividade do solo, em $\Omega \cdot \text{cm}$
 N = número de anodos
 S = dobro da profundidade do anodo, em cm
 a = espaçamento entre-anodos, em cm

5.9 Resistência dos condutores elétricos

5.9.1 A resistência de um segmento de condutor elétrico é dada pela relação:

$$R_c = \ell \cdot r$$

Onde:

- R_c = resistência do segmento de condutor, em Ω
 ℓ = comprimento do condutor, em m
 r = resistência linear do condutor em Ω/m

5.9.2 A Tabela 2 fornece a resistência linear de condutores de cobre nas bitolas normalmente empregadas em trabalhos de proteção catódica.

TABELA 2 - Resistência de condutores de cobre x comprimento linear

Bitola (AWG)	(Ω/m)
10	$3,92 \times 10^{-3}$
8	$2,07 \times 10^{-3}$
6	$1,30 \times 10^{-3}$
4	$0,815 \times 10^{-3}$
2	$0,519 \times 10^{-3}$
0	$0,322 \times 10^{-3}$

5.9.3 Para leitos de anodos cuja disposição está esquematizada na Figura 1, o valor de l é dado pela relação: $l = x + y/4$.

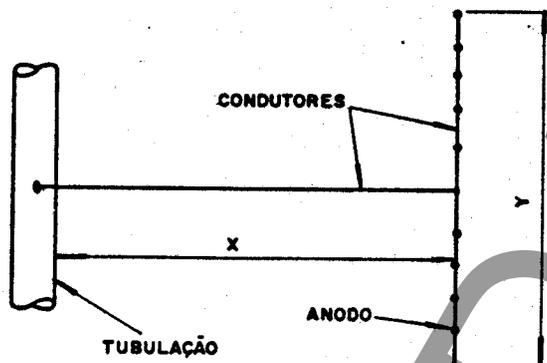


FIGURA 1 - Esquema de um tipo de disposição de leito de anodos.

5.9.4 Para leitos de anodos cuja disposição são esquematizadas na Figura 2, o valor de l é dado por: $l = x + y/2$.

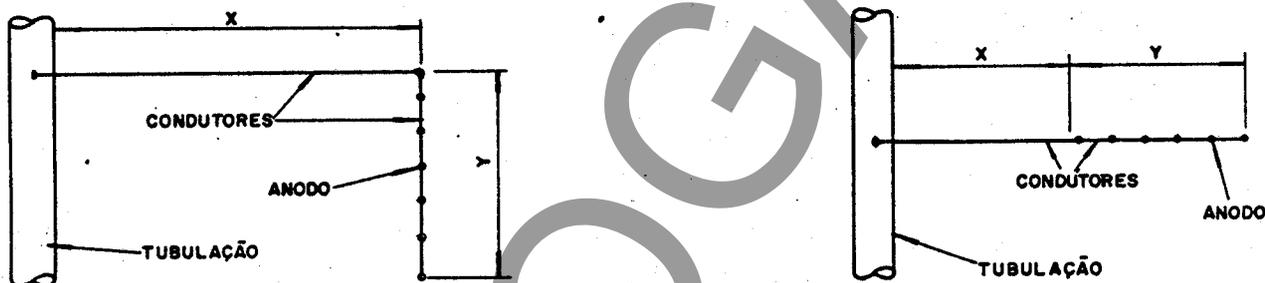


FIGURA 2 - Esquemas de tipos de disposição de leito de anodos.

5.10 Resistência total do circuito

A resistência total do circuito de uma instalação de proteção catódica é dada pela relação:

$$R_t = R_a + R_c$$

Onde:

R_t = resistência total do circuito, em Ω

R_a = resistência do leito de anodos, calculada segundo item 5.8, em Ω

R_c = resistência do condutor elétrico, em Ω

5.11 Corrente liberada pelo leito de anodos

5.11.1 A corrente liberada pelo leito de anodos é dada pela relação:

$$I_L = \frac{\Delta V}{R_t}$$

Onde:

I_L = corrente liberada pelo leito de anodos, em A

ΔV = diferença do potencial entre o leito de anodos e a tubulação, em V

R_t = resistência total de circuito, em Ω

5.11.2 A Tabela 3 indica os valores de ΔV .

TABELA 3 - Valores de ΔV em função da espécie de anodo

<u>anodo</u>	<u>ΔV (V)</u>
zinco	0,25
alumínio	0,25
magnésio	0,85
ferro-silício	(ver nota)
grafite	(ver nota)

NOTA: Depende da tensão de saída do conjunto transformador-retificador a qual não deve ser maior de que 50 V em áreas públicas e 100 V em áreas onde só tem acesso pessoal autorizado.

5.12 Vida útil do leito de anodos

5.12.1 A vida útil do leito de anodos é dada pela relação:

$$v = f \frac{m_a \times N}{I_L}$$

Onde:

v = vida útil do leito de anodos, em anos

f = fator que depende do material dos anodos utilizados

m_a = massa individual do anodo, em kg

N = número de anodos utilizados

I_L = corrente liberada pelo leito de anodos, em A

5.12.2 A Tabela 4 fornece os valores do fator f.

TABELA 4 - Valores de f x espécie de anodo

<u>anodo</u>	<u>f</u>
zinco	72
alumínio	180
magnésio	116
ferro-silício	2023
grafite	2125

5.12.3 A vida útil mais econômica para anodos de sacrifício é de 10 a 15 anos e para sistemas de proteção por corrente impressa é de 30 a 50 anos.

5.13 Resistência máxima permitida para o circuito

5.13.1 No dimensionamento de um sistema de proteção catódica por anodos de sacrifício, a decisão sobre as dimensões e o número de anodos a serem utilizados, deve ser tomada com base na resistência máxima permitida para o circuito.

5.13.2 A resistência máxima permitida para o circuito é dada pela relação:

$$R_m = \frac{\Delta V}{I}$$

Onde:

R_m = resistência máxima do circuito, em Ω

ΔV = diferença de potencial entre o leito de anodos e a tubulação, em V

I = demanda de corrente do leito de anodos, em A.

5.13.3 A Tabela do ítem 5.11.2 relaciona a diferença de potencial ΔV com a espécie de anodos utilizados.

5.14 Conjunto transformador-retificador

5.14.1 A finalidade do transformador-retificador é fornecer corrente contínua para a proteção catódica da tubulação.

5.14.2 O transformador-retificador deve funcionar em regime, com 60% a 70% de sua máxima capacidade.

5.14.3 A corrente nominal do transformador-retificador é dada pela relação:

$$I_N = 1,4 I$$

Onde:

I_N = corrente nominal, em A

I = demanda de corrente do leito de anodos, em A.

5.14.4 A tensão nominal de saída do transformador-retificador é dada pela relação:

$$V_N = I_N R_t$$

Onde:

V_N = tensão nominal de saída, em V

I_N = corrente nominal, em A

R_t = resistência total do circuito, em Ω .

5.14.5 O transformador-retificador deve possuir recursos para ajustes de saída.

ANEXO A - ROTEIRO PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICAA-1 PROTEÇÃO CATÓDICA POR ANODOS DE SACRIFÍCIO E POR CORRENTE IMPRESSA

A-1.1 Coleta do maior número possível de informações sobre a tubulação e sobre a região onde está ou será assentada.

A-1.2 Seleção dos locais onde deverão ser assentados os leitos de anodos. Por questões econômicas, os leitos devem ser assentados nos locais onde o solo apresenta os menores valores de resistividade.

A-1.3 Seleção do trecho da tubulação que se pretende proteger com um determinado leito de anodos.

A-1.4 Cálculo da densidade de corrente necessária à proteção de acordo com o Item 5.1.

A-1.5 Avaliação da eficiência do revestimento, segundo item 5.2, caso não exista dados a seu respeito.

A-1.6 Cálculo da extensão máxima que pode ser protegida pelo leito de anodos, segundo item 5.3.

A-1.7 Cálculo da demanda de corrente do leito de anodos, segundo item 5.5, e da intensidade da corrente de proteção, segundo item 5.4. Observar $I > I_p$.

A-1.8 Cálculo da massa mínima de anodos segundo item 5.6.

A-1.9 Cálculo do número mínimo de anodos, segundo item 5.7.

A-2 PROTEÇÃO CATÓDICA POR ANODOS DE SACRIFÍCIO

Após o atendimento ao item A-1, tem-se:

A-2.1 Cálculo da resistência máxima para o circuito, segundo item 5.13.

A-2.2 Cálculo da resistência do condutor elétrico, segundo item 5.9. Nesta fase é necessária uma estimativa do comprimento e bitola do condutor a ser utilizado.

A-2.3 Cálculo da resistência máxima permitida para o leito de anodos, segundo a relação:

$$R_{Ma} = R_M - R_C$$

Onde:

R_{Ma} = resistência máxima do leito de anodos, em Ω
 R_M = resistência máxima do circuito, em Ω
 R_C = resistência do condutor, em Ω .

A-2.4 Cálculo da resistência do leito de anodos, segundo item 5.8. Observar que $R_a < R_{Ma}$. Caso isto não ocorrer, pode-se utilizar um maior número de anodos ou anodos com outras dimensões.

A-2.5 Cálculo da resistência total do circuito, segundo o item 5.10. Nesta fase pode-se recalcular R_a e R_C de modo que $R_t < R_M$ e que o custo da instalação se ja o menor possível.

A-2.6 Cálculo da corrente liberada pelo leito de anodos, segundo item 5.11.

A-2.7 Cálculo da vida útil real do leito de anodos, segundo 5.12. Observar que a vida útil real não deve ser inferior à prevista.

A-2.8 Apresentação dos resultados.

A-3 PROTEÇÃO CATÓDICA POR CORRENTE IMPRESSA

Após o atendimento ao item A-1, tem-se:

A-3.1 Cálculo da resistência do leito de anodos, segundo item 5.8.

A-3.2 Cálculo da resistência do condutor, segundo item 5.9.

A-3.3 Cálculo da resistência total do circuito segundo item 5.10.

A-3.4 Especificação do conjunto transformador-retificador, segundo item 5.14.

A-3.5 Apresentação dos resultados.

ANEXO B - COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE PROTEÇÃO

CORRENTE GALVÂNICA	CORRENTE IMPRESSA
1) Não necessita de nenhuma fonte de energia elétrica.	1) Requer fonte de energia elétrica.
2) Uso geralmente restrito à tubulações bem revestidas, porque sua limitada corrente torna-o inviável fora destas condições.	2) Pode ser aplicado em larga faixa de operação.
3) Pode ser impraticável, exceto quando o solo é de baixa resistividade.	3) A resistividade do solo tem pouca influência.
4) De fácil instalação; ampliações podem ser feitas sem problema.	4) Necessita de projeto cuidadoso.
5) Requer grande número de anodos.	5) Requer, em geral, pequeno número de anodos.
6) Pouco afeta as estruturas metálicas vizinhas.	6) Requer verificação de estruturas metálicas vizinhas e, às vezes, providências para não afetá-las.
7) Custo operacional relativamente baixo.	7) Custo operacional relativamente alto.