

Proteção catódica das linhas de concreto protendido

Eng. EDUARDO GOMES DOS REIS

Departamento de Águas e Esgotos de S. Paulo

A ligação das Estações de Tratamento de Santo Amaro e do Alto da Boa Vista à Estação Elevatória do Jardim Paulista, é feita pelas linhas de gravidade ϕ 1,10 m, em concreto protendido.

Para a sua duração indefinida projetou-se uma proteção elétrica contra a corrosão de suas partes metálicas.

Expomos a seguir o que seja a proteção elétrica ou catódica e a sua aplicação nas linhas de gravidade de Santo Amaro, em concreto protendido.

I — INTRODUÇÃO

A corrosão de tubos de aço, ferro fundido e concreto armado, é um fenómeno bastante conhecido. Algumas vezes atinge tal intensidade que torna necessário a troca das peças atacadas.

Embora bastante conhecido, surgem problemas complexos quando se trata da sua eliminação.

Atribue-se a sua existência aos solos agressivos, e aos terrenos húmidos contendo elementos nocivos, assim como às correntes de retorno, provenientes das linhas de bonde e trens elétricos.

II — RECORDAÇÃO

Todo o metal introduzido num banho eletrolítico (fig. 1), tende a se transformar:

- Em ions metálicos positivos Me^{++} que possam para a solução.
- Em eletrons negativos e^{-} que ficam sôbre o metal e o carregam negativamente.

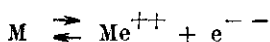
Por exemplo, introduzindo-se uma lâmina de ferro numa solução de ácido sulfúrico teremos a seguinte reação:



A porção de ferro despreendida da lâmina para se combinar com o ácido sulfúrico, passa para a solução sob a forma de ions de ferro, e não sob a forma atômica completa. Como se sabe, um corpo ionizado perde alguns eletrons periféricos, em tanto maior número quanto maior fôr o grau de ionização. Esses eletrons saídos do átomo de ferro ionizado, passam para o restante do metal ainda não atacado e o carregam elêtricamente com a sua carga negativa.

Essa reação prossegue até o desaparecimento completo da lâmina de ferro, ou da transformação completa do ácido sulfúrico em sulfato de ferro.

Nesta última hipótese será obtido um equilíbrio estável representado pela fórmula seguinte:



Sendo M o metal considerado, Me^{++} o ion metálico positivo, e e^{-} os eletrons (negativos).

Como vemos, não havendo causa exterior, cessará o ataque do metal depois de atingida a equação de equilíbrio.

Mas si esta fór destruída, o equilíbrio tende a se restabelecer com a formação de novos ions metálicos Me^{++} , havendo como que uma dissolução do metal no meio eletrolítico. Evidentemente, essa dissolução é a causa da corrosão.

Na fig. 2 está representado um metal M mergulhado num meio eletrolítico e elêtricamente ligado a um condutor insolúvel, como a grafite por exemplo.

Carregando-se negativamente com os eletrons provenientes do metal, a grafite atrai e neutraliza os ions metálicos positivos existentes no banho.

Essa operação se prolongará até a extinção total do metal, ou até a formação do equilíbrio anteriormente descrito, pela metalização da grafite, devido ao metal proveniente dos ions neutralizados que se depositam sôbre ela.

É evidente que essa dissolução do metal no meio eletrolítico, também chamada corrosão, é tanto mais intensa quanto maior fór a sua agressividade.

Porém, tanto no caso referente à figura 1, como à figura 2, si houver constante renovação do meio eletrolítico, a forma de equilíbrio nunca será atingida, e a dissolução do metal sob a forma de ions metálicos se processará até o seu completo desaparecimento. É o que sucede com as peças metálicas em contato direto com o solo ou com a água.

III — PRINCÍPIO DA PROTEÇÃO

Si ao invéz de se permitir a saída de eletrons do metal M, como indica a figura 3, se fizer a introdução de outros eletrons provenientes de uma fonte de corrente continua, evidentemente o metal deixará de se dissolver e a corrosão terá cessado completamente.

Devido à passagem da corrente elétrica no meio eletrolítico, os ions metálicos existentes no mesmo se dirigirão para o metal M, neutralizando-se e depositando-se sôbre êle. O introdutor de corrente no meio eletrolítico, também chamado *anodo* é que tenderá a se dissolver. Si êste fór constituído de um corpo condutor insolúvel como a grafite por exemplo, se depositarão sôbre o metal ions neutralizados, metálicos ou de hidrogênio já existentes no meio eletrolítico.

Devido a êsse depósito metálico ou hidrogenoso sôbre o metal, cessada a corrente protetora, durante um tempo maior ou menor não se verificará a corrosão. Êsse fenômeno é chamado comumente de *passivação*.

Há duas maneiras de se proteger uma peça metálica contra a corrosão por meio da corrente elétrica.

a) Colocando-se um anodo no meio eletrolítico em que está mergulhado o metal a se proteger e ligando-se ambos a uma fonte de corrente continua.

Conforme se vê na figura 3, o polo negativo é ligado ao metal e o positivo ao anodo. Êste poderá ser constituído por um corpo condutor insolúvel ou por um metal cuja corrosão não tenha importância em face daquêle a que se quer proteger. Essa operação é denominada pròpriamente de *proteção catódica*.

b) A outra maneira de se proteger o metal contra a corrosão, consiste em se mergulhar no meio eletrolítico um anodo elêtricamente ligado àquele como indica a figura 4. Êsse anodo deverá ter maior capacidade de dissolução do que o metal a ser protegido. Em outras palavras, o anodo deverá ser mais suscetível de corrosão do que o metal em questão. Êsse anodo fornece mais eletrons ao metal do que êste àquele. Mais adiante trataremos da capacidade de dissolução e do potencial eletronegativo dos diversos metais. Como exemplo diremos que si o metal M fór constituído de uma lâmina de ferro e o anodo A de uma lâmina de zinco, enquanto esta estiver exposta no banho eletrolítico e não se recobrir de oxidos protetores, a lâmina de ferro não sofrerá nenhum ataque. Essa operação é a que se denomina pròpriamente de *proteção galvânica*.

IV — APLICAÇÃO

Em linhas gerais, pelo que ficou dito, a proteção catódica de uma tubulação metálica enterrada consiste em se colocar ao lado da mesma, uma série de anodos ligados ao polo positivo de uma fonte de corrente continua, como se vê na figura 5. O polo negativo da mesma será ligado à tubulação ou peça metálica

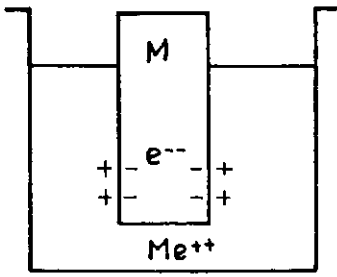


fig 1

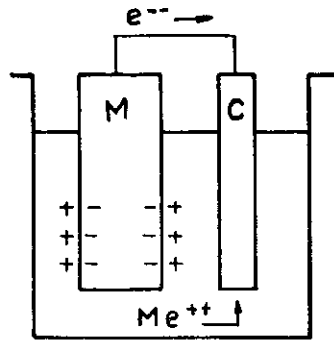


fig 2

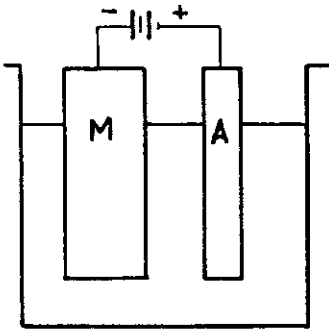


fig 3

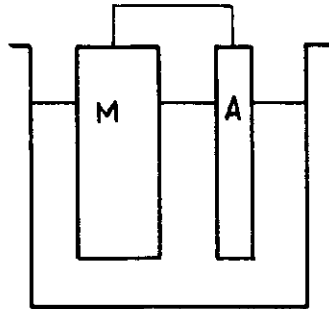


fig 4

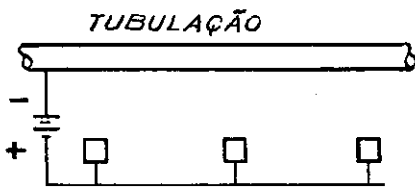


fig 5

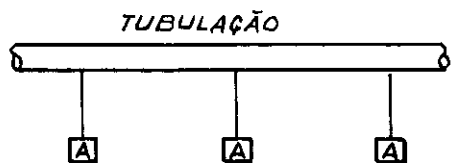


fig 6

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DAS AGUAS DOCES

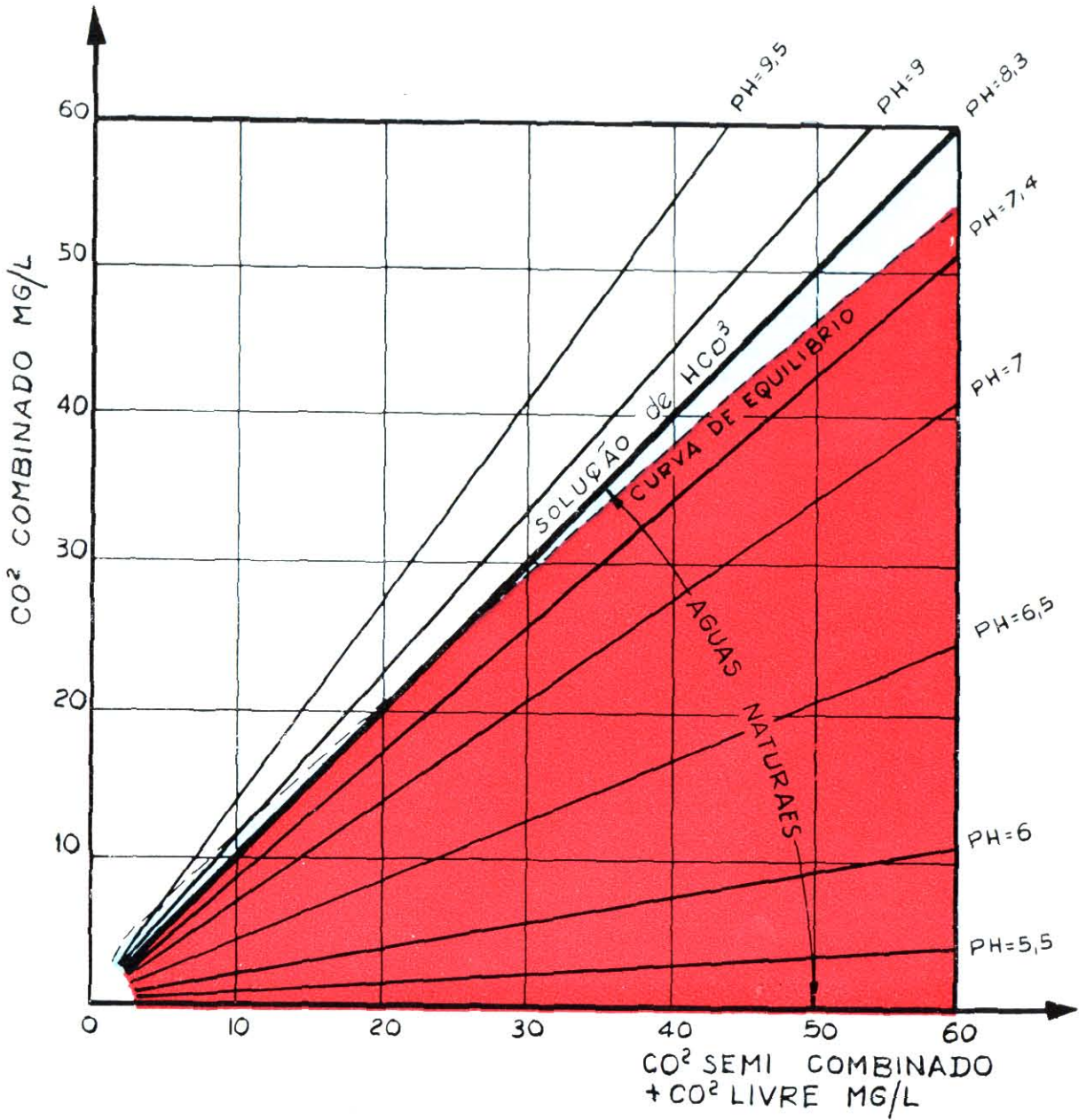


Fig. 7

que se quer proteger. Como dissemos anteriormente, essa é a chamada *proteção catódica*. A mesma tubulação poderá ainda ser protegida por meio de anodos de um metal de maior capacidade de dissolução, como o zinco e o magnésio por exemplo, colocados ao longo da mesma e ligados eletricamente a ela (figura 6). Também como foi dito anteriormente, essa operação tem o nome de *proteção galvânica*.

V — CONSIDERAÇÕES

Como vimos, introduzindo-se certa quantidade de um dado metal (o ferro por exemplo) num banho eletrolítico, haverá uma dissolução daquêle sob a forma de ions metálicos positivos, carregando-se o restante do metal negativamente.

Essa carga elétrica poderá ser medida por um voltímetro, ligando-se as saídas dêste ao metal e ao banho eletrolítico. Verificar-se-á que a diferença do potencial em volts é função de dois elementos principais:

- a) Do pH do banho eletrolítico.
- b) Do metal mergulhado no banho.

Evidentemente quanto menor fôr o pH do banho, maior o ataque químico é consequentemente maior a diferença de potencial. Assim o zinco introduzido num banho de $\text{pH} = 0$, apresenta um potencial igual a $-1,5$ volts, e num banho de $\text{pH} = 14$ o seu potencial é de $-0,75$ volts. Nos mesmos banhos anteriormente descritos, veremos que o ferro apresenta potenciais menores do que os do zinco; e o magnésio, potenciais maiores. O cobre por sua vez apresenta potenciais menores ainda do que os do ferro. Para um determinado pH o potencial é proporcional à capacidade de ataque, corrosão, ou dissolução do metal. Há ligas magnesianas que apresentam um máximo de potencial eletronegativo para um determinado pH.

VI — GENERALIDADES

A corrosão das construções metálicas subterrâneas acha-se explicada de modo satisfatório pela teoria eletro-química, como foi exposto anteriormente. A corrente elétrica deixando uma superfície metálica para entrar no solo em contacto com a mesma, acarretará uma perda de metal no ponto de saída que é chamado área anódica. A superfície na qual a corrente entra de novo no metal é conhecida pelo nome de área catódica e não apresentará sinais de corrosão. Essas superfícies catódicas e anódicas podem estar separadas apenas por alguns centímetros, causando picadas características de corrosão local, ou então separadas de vários hectômetros, causando assim uma corrente que se escoia através da canalização. Essas duas corrosões de origem galvânica que vamos sucessivamente examinar constituem o fenômeno de autocorrosão.

VII — AUTOCORROSÃO ELETRO-QUÍMICA LOCAL

Os ions agressivos contidos na água do solo (em particular os ions Cl^-) podem atacar o metal aproveitando um defeito de revestimento. Esse ponto de ataque vê o seu potencial decrescer, formando assim uma pilha eletroquímica com o resto do tubo não atacado. A corrosão eletro-química local prossegue e amplia os efeitos da corrosão química, dependendo da agressividade específica do terreno, isto é:

- a) da concentração em ions agressivos (cloretos e sulfatos) e da acidez do solo (pH).
- b) do grau de humidade do solo; a água sendo o veículo dos ions agressivos.

A agressividade específica de um solo pode ser de origem salina, caso êste em que ela se acha suficientemente definida pela medida da resistividade do mesmo, que pode ser executada, seja no laboratório, seja no local do terreno. Costuma-se classificar os solos em 4 graus de agressividade segundo a sua resistividade.

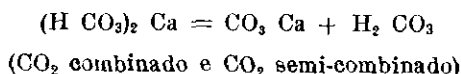
CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Classe	Resistividade ohms/cm ² /cm	Corrosão
1	mais de 5.000	Nada ou pouco agressivo
2	1.500 a 3.000	Ligeiramente agressivo
3	500 a 1.500	Agressivos
4	menos de 500	Muito agressivos

A agressividade especifica pode ser por outro lado de origem ácida, e neste caso será determinada por medição do p H. do solo ou da água contida.

Vamos considerar o conjunto água natural e bicarbonatos.

O bicarbonato de cálcio $(HCO_3)_2Ca$ é constituído por uma molécula de carbonato de cálcio e uma molécula de ácido carbónico, que pode ser eliminado por ebulição.



O CO₂ ligado ao óxido de cálcio (CaO) é chamado CO₂ combinado, e o CO₂ que pode ser eliminado por ebulição é chamado CO₂ semi-combinado.

Considerando-se um diagrama retangular com o CO₂ combinado em ordenadas e o CO₂ semi-combinado em abcissas, a solução de bicarbonato é representada pela linha bissetriz do ângulo XOY. Ela tem um p H. constante, igual a 8,3 conforme se vê na figura 7.

As águas naturais contém bicarbonato de cálcio e ácido carbónico livre. Se este último for colocado em abcissas, os pontos representativos das águas naturais estarão no ângulo inferior do diagrama.

Se nesse diagrama representarmos a curva da solubilidade do calcário CO₃Ca, as águas agressivas estarão situadas na parte colorida em vermelho. Elas estarão situadas tanto mais internamente a esta zona quanto mais se afastarem da curva de equilíbrio.

Sobre essa curva a água está em equilíbrio com o calcário, enquanto que acima dela a água é incrustante.

As águas com o mesmo p H. se encontram sobre uma mesma reta passando pela origem.

O tratamento de uma água agressiva consiste em se levar seu ponto representativo nas vizinhanças da curva de equilíbrio.

VIII — AUTOCORROSÃO SOB O EFEITO DE PILHAS GEOLÓGICAS

Esse gênero de corrosão ocorre quando uma canalização boa condutora de corrente elétrica atravessa terrenos muito diferentes uns dos outros pela taxa de aeração, de humidade, pelo teor de sais dissolvidos e pelo p H.. A canalização constitui o circuito de pilhas geológicas nascidas da dissimetria do meio electrolítico.

Na prática, as áreas anódicas cujo potencial é o mais eletronegativo, estão localizadas nos pontos baixos, em terrenos húmidos e as vezes salgados.

As zonas catódicas, de potencial menos eletro-negativo formam-se nos pontos altos onde situam-se terrenos mais ventilados, mais secos, e menos salgados. Este efeito de pilha cuja força eletro-motriz pode variar entre 0,2 e 0,4 volts é tanto mais desastroso quanto a canalização for condutora. A corrente escoá-se na canalização das zonas catódicas rumo às zonas anódicas, deixando aí a tubulação para fechar o circuito elétrico através do solo. Medidas efetuadas em canalizações com camisa de chapa de aço permitiram apreciar quantidades de corrente podendo alcançar até 2 ampéres. Avaliar-se-á o perigo de corrosão considerando que uma corrente de um ampere emitida pela linha é capaz de dissolver 10 quilos de aço por ano.

Independentemente destes fenômenos de autocorrosão, a canalização pode também achar-se em perigo quando submetida a ação de correntes vagabundas. É o terceiro caso que consideraremos resumidamente.

Nas instalações de tração elétrica os trilhos são geralmente aproveitados como condutores de corrente de retorno. A linha apresentando defeitos de condutibilidade ou de isolamento, parte da corrente de retorno se desperdiça no solo.

Esta corrente assim desperdiçada é orientada de preferência para os encaamentos metálicos enterrados nas vizinhanças dos trilhos, desde que o traçado seja favorável. A corrente ao deixar a canalização para voltar às subestações, produz uma eletrólise, e portanto em ataque ao metal que causa rapidamente a perfuração dos tubos.

A presença de correntes vagabundas é revelada igualmente pela medida dos potenciais, que, no caso, são variáveis com o decorrer do dia. É o que permite diferenciá-las das correntes constantes de circulação de origem puramente eletro-química. Estas últimas apresentam apenas variações de uma estação do ano a outra, acompanhando as variações de humidade do solo.

IX — MÉTODO DE PROTEÇÃO

As explicações dadas acima, mostram que quando uma corrente elétrica deixar a canalização para seguir no terreno que a circunda, há corrosão, em compensação quando a corrente entrar na canalização, não há corrosão.

Basta pois achar um dispositivo que se oponha às saídas de corrente, ou melhor que permita à canalização receber ao invés de emitir corrente. Tal é o principio da proteção catódica, que consiste em tornar passivo o metal com a ajuda de uma fonte auxiliar de origem galvânica (anodos reativos de magnésio) ou de origem industrial (proteção elétrica). Por esses processos, transforma-se artificialmente o metal em catodo, mediante um anodo artificial enterrado nas proximidades da canalização.

Resulta de experiências feitas que a proteção catódica do aço fica assegurada desde que o potencial seja baixado até — 0,85 volts, em relação a um eletrodo de sulfato de cobre, fig. 8, como referência.

A densidade de corrente a se admitir por unidade de superfície do metal para se obter esse abaixamento de potencial é função do meio circundante; essa densidade deve ser tanto mais forte quanto mais agressivo fôr o meio. Para o aço nú na água do mar a densidade de corrente deve ser pelo menos de 30 miliampères por metro quadrado de superfície a se proteger. Para o aço nú, num solo bastante agressivo ela é da ordem de 10 miliampères por metro quadrado. Para o ferro coberto de concreto ela varia com a qualidade e a espessura do concreto, e com a agressividade do terreno em contacto com o mesmo. Os limites extremos são praticamente de 1 a 10 miliampères por metro quadrado.

Dos ensaios, em escala industrial, efetuados sobre tubos de concreto percintado, resultou que a densidade de corrente a se admitir é da ordem de 1 miliampère por m². A polarização de — 0,85 Volts é então obtida depois de três meses.

X — PROTEÇÃO ELÉTRICA

A presença de linhas de baixa tensão nas imediações da canalização leva a preferir a proteção elétrica ao em vez da proteção galvânica. É uma regra geral na prática da proteção catódica. O principio da proteção elétrica consiste em se ligar ao polo negativo de um gerador de corrente a canalização a ser protegida, enquanto o polo positivo é ligado a um anodo de metal ou de grafite enterrado a uma certa distância da canalização. A corrente partindo do anodo atravessa o solo, é captada pela canalização e volta a seguir até a fonte de corrente pelo fio de ligação. Chamamos tomada, ao ponto em que o fio de ligação está em contacto com a canalização.

Foi estudado matematicamente o problema para o caso de canalização provida de um revestimento protetor de juta-asfalto de boa qualidade, e um anodo

ELETRODO DE SULFATO DE COBRE

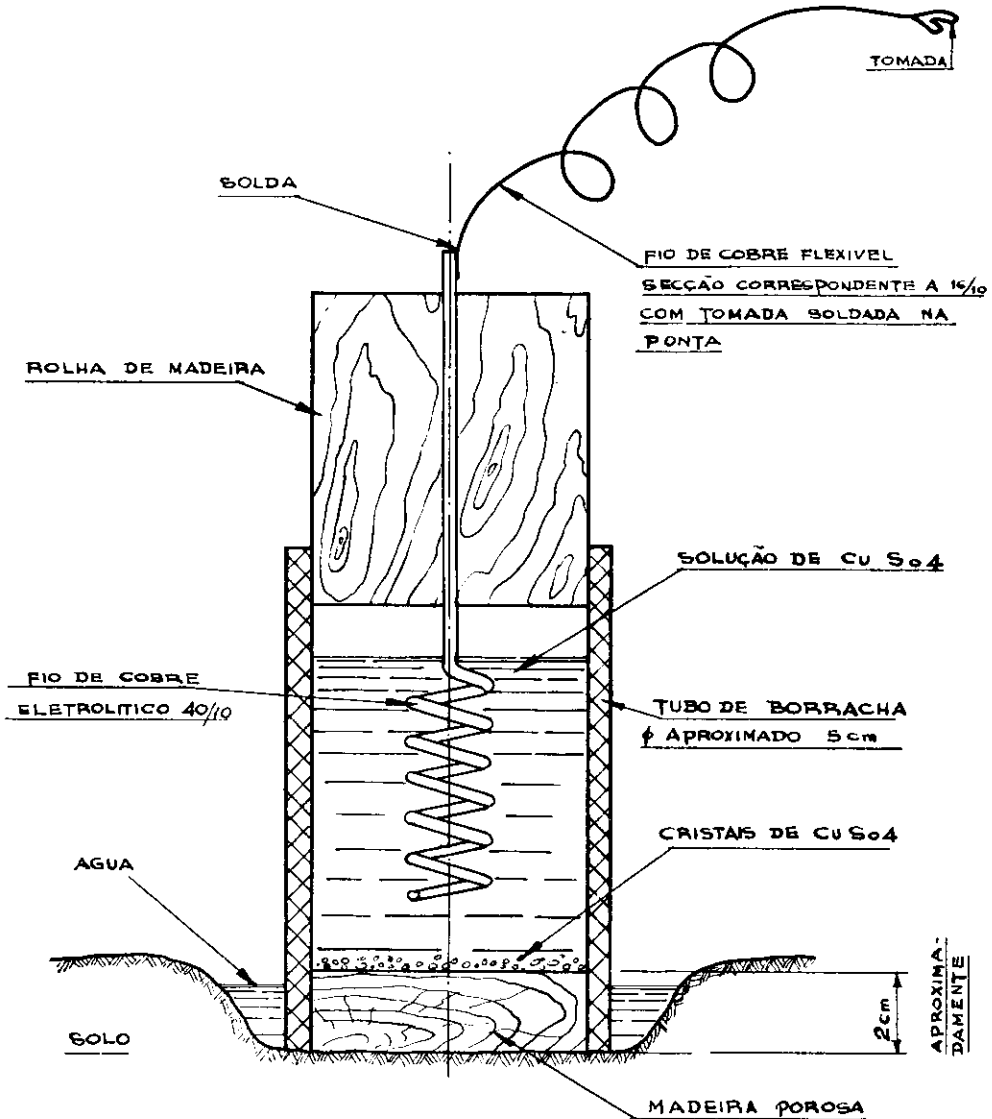


FIG. 8

colocado a distância suficiente para que se possa desprezar a resistência do solo, sendo:

I_s a intensidade da corrente de saída, que se retira da metade da canalização.

I a intensidade da corrente de circulação na canalização a uma distância x do ponto de tomada.

E_s potencial da canalização na secção transversal passando pelo ponto de tomada.

E o potencial da canalização a uma distância x deste ponto.

r a resistência elétrica da canalização dada em ohms por metro linear.

t a resistência do revestimento da canalização em ohms por metro linear.

Verificando-se uma entrada de corrente por um elemento de canalização dx situado a uma distância x do ponto de tomada, temos:

$$dI = \frac{E dx}{t}$$

Por outro lado a queda de tensão nesse trecho dx percorrido pela corrente I é:

$$dE = r I dx$$

Diferenciando em relação a x obtém-se as seguintes equações diferenciais:

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = \frac{r}{t} I \quad \text{e} \quad \frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{r}{t} E$$

Para uma canalização de comprimento infinito, as condições nos limites são:

Para

$$x = 0; \quad I = I_s; \quad E = E_s$$

Para

$$x = \infty; \quad I = 0; \quad E = 0.$$

As soluções particulares são:

$$I = I_s e^{-x \sqrt{\frac{r}{t}}}$$

$$E = E_s e^{-x \sqrt{\frac{r}{t}}}$$

As funções $I = f(x)$ e $E = f(x)$ são pois exponenciais. As equações salientam as influências da resistência elétrica da canalização (r), e da sua resistência de terra (t), isto é, da qualidade do revestimento.

Conclue-se que quanto maiores forem a condutibilidade da canalização e a sua resistência de terra, menor a corrente de proteção e mais extensa a secção protegida.

XI — APLICAÇÃO À CANALIZAÇÃO DE CONCRETO PROTENDIDO

Si para uma canalização bem isolada por um revestimento betuminoso, poder-se-ia sempre pelas equações anteriores calcular a distribuição da corrente desprezando-se a resistividade do terreno diante da do betume, não se dará o mesmo com uma canalização de concreto para a qual esta simplificação não é mais admissível, devendo-se então recorrer à experiência.

A aplicação de tal dispositivo (fonte externa de corrente com ponto de tomada) a uma canalização condutora de concreto percintado, mostra que

as funções $I = f(x)$ e $E = f(x)$ são exponenciais com pontas muito acentuadas.

A representação do fenômeno é mostrada na figura 9, curva *a*, na qual são levadas em abcissas os comprimentos e em ordenadas os ΔE .

ΔE representa em um ponto a diferença entre os potenciais, corrente passando e corrente cortada, expressa em milivolts; e é função da densidade de corrente no ponto considerado.

Constata-se que a distribuição de corrente é insatisfatória; muito grande no ponto de tomada onde há polarização intensa, ela diminui sensivelmente a 300 m. de cada lado deste ponto.

Para se fazer com que desapareça essa ponta, parece lógico ter dois pontos de tomada.

Na figura 9, damos as curvas ΔE em função da distância entre os pontos de tomada, para um trecho de 2 km, tratado por uma fonte externa de voltagem constante *V*, como segue:

Curva b,	distância entre os pontos de tomada	200 m.
c,	" " " " " "	400 m.
d,	" " " " " "	800 m.

No intuito de se ter a melhor distribuição possível da corrente de proteção adotaremos uma distância entre os pontos de tomada igual a um terço do comprimento a se proteger.

Nós vimos que, para que uma tal proteção seja possível, é preciso que a canalização seja eletricamente condutora. Ora, no caso da adutora de Santo Amaro, a concepção do tubo é tal que para se ir de um ponto a outro, a corrente é obrigada a seguir as percintas de aço duro, passando de um tubo a outro pela junta de chumbo cordado batido. O comprimento das percintas é tal que a canalização não pode ser considerada como sendo eletricamente condutora.

Mostraremos adiante que uma canalização formada pela reunião de tais tubos não é condutora, e que é necessário, se quisermos fazer uma proteção elétrica, assentar um cabo ao longo da mesma e o ligar a cada tubo.

XII — CASOS PARTICULARES DE LOCAIS HABITADOS

Em geral na proteção elétrica os anodos são constituídos por restos de aço ou por cilindros de grafites, enterrados a uma distância da canalização variando de 6 a 100 m.

A corrente enviada por um gerador se distribui pelo solo até distâncias muito grandes, de modo a atingir as extremidades do trecho de canalização a se proteger.

Si esse esquema de instalação for simples quando a canalização se achar no campo, deve-se entretanto, quando ele atravessar lugares habitados, tomar certas precauções com relação à presença de outros condutores metálicos que a acompanham ou a atravessam, para que a distribuição da corrente se faça de modo uniforme, e a presença do campo elétrico não seja uma causa de corrosão das canalizações já existentes.

É preciso então prevêr anodos distribuídos ao longo do traçado, colocados próximos à canalização, de maneira a reduzir seu campo de ação.

Quanto às canalizações já existentes, elas devem ser, se necessário, ligadas eletricamente àquela a se proteger.

XIII — CONCLUSÕES

É preciso pois, se quisermos proteger eletricamente a adutora de Santo Amaro em concreto protendido, prever ao longo do seu traçado as seguintes cousas:

- a) um cabo catódico, podendo ser em fios de aço betuminados, ligado a cada tubo da canalização.
- b) um cabo anódico em fios de cobre isolados, suportando os anodos.

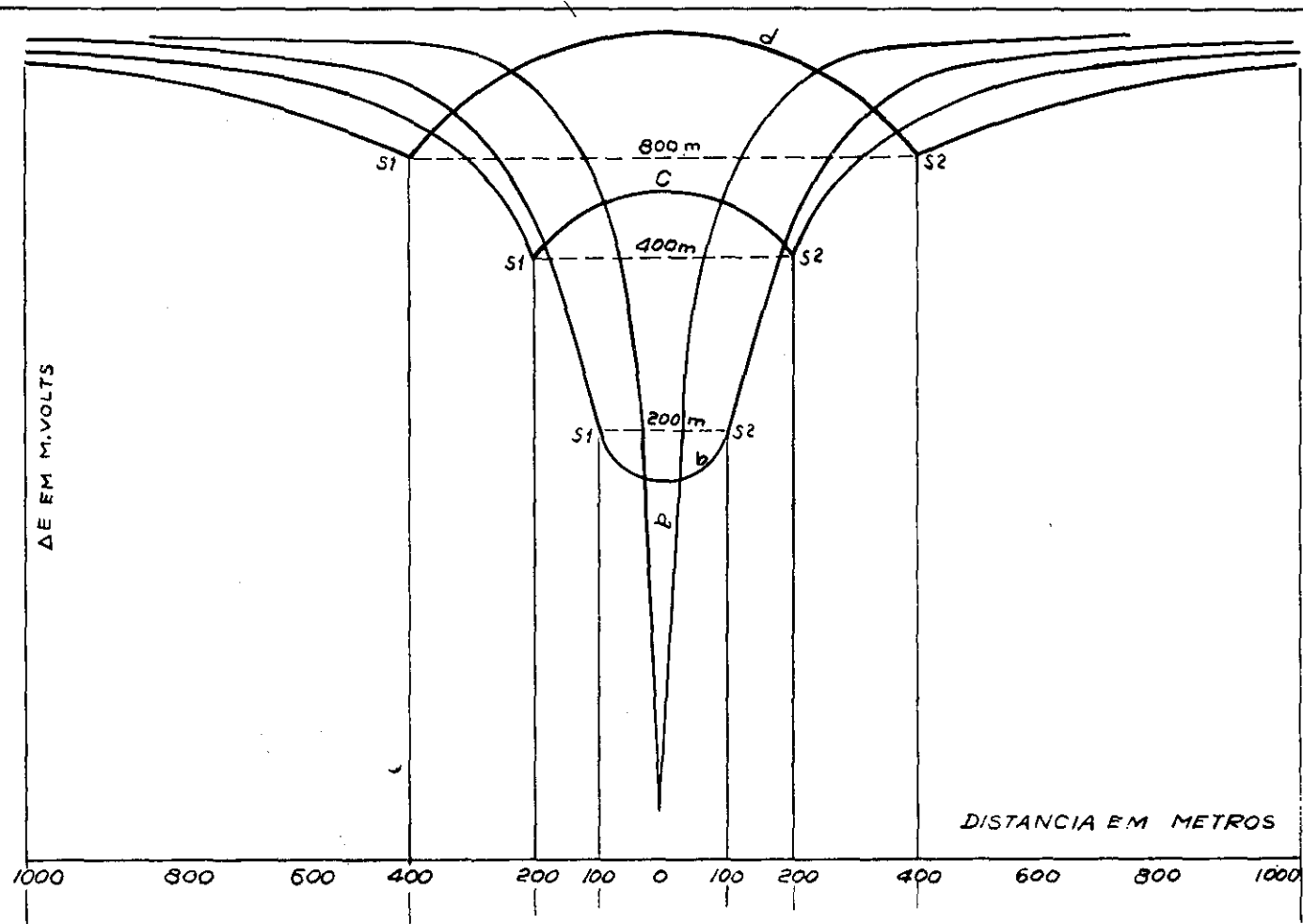


FIG. 9

XIV — PROTEÇÃO GALVÂNICA

Há mais de um século que a proteção dos revestimentos de cobre dos cascos dos navios é assegurada por placas de zinco.

Sòmente por volta de 1945 que os anodos de magnésio foram utilizados comercialmente na proteção das canalizações.

O magnésio tendo um potencial da ordem de — 1,5 volts, forma o polo negativo de uma pilha quando é ligado a um metal ferroso cujo potencial de corrosão é de — 0,6 v.

1 kg. de magnésio é capaz de fornecer teoricamente 2.200 amperes-horas, mas praticamente êste valor não é alcançado.

O rendimento de um anodo é igualmente função de vários outros fatores, como sejam:

a) a composição do metal em si:

As ligas magnésio têm um rendimento superior ao do magnésio puro. A liga tipo proteção galvânica têm a composição seguinte:

Mg	90
Al	5,3 a 6,7
Zn	2,5 a 3,5
Mn	0,15 (máximo)
Si	0,30
Cu	0,05
Ni	0,003
Fe	0,003

b) Influência do meio:

O meio que envolve o anodo pode agir de vários modos:

Polarizar o anodo, isto é, criar em sua superfície uma contra força eletromotriz que tenda a diminuir seu potencial.

Atacar quimicamente o anodo.

A eficiência de um anodo depende pois muito do meio no qual é colocado. Geralmente êle é envolvido de uma massa de enchimento constituída por uma mistura de betonite e gipso. A fim de aumentar o potencial de trabalho do anodo nos solos pouco condutores e ácidos, pode-se igualmente acrescentar sulfato de sódio e magnésio.

c) Influência do tamanho de anodo.

A superfície do anodo deve ser tal que a densidade de corrente (vazão/superfície) seja da ordem de 4 a 7 m. A dm². Variando o comprimento e o diâmetro podemos ter anodos cuja vida e necessidade podem se aplicar a qualquer obra a se proteger.

Em geral calculam-se os anodos em magnésio com base de rendimento de 50%, mas levando-se em conta que os terrenos onde se encontra a adutora de Santo Amaro são saturados de água, o ataque químico dos anodos será exagerado. Propomos reduzir êste rendimento para 30%, isto é, que um 1 kg de magnésio seja suscetível de fornecer 660 amperes-hora.

XV — CÁLCULO DA QUANTIDADE DE METAL A SE EMPREGAR

Para se calcular a quantidade de metal anódico necessário para proteger uma canalização, é preciso fixar:

- a) A duração da proteção (por exemplo 10 anos).
- b) a intensidade necessária para proteger 1 m² de superfície de aço. Adotaremos o valor de 1 mA/m².

Cada tubo contém 1 000 m. de fio de aço duro de 5 mm. de diâmetro. A superfície das percintas de aço é pois:

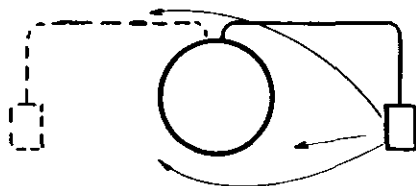
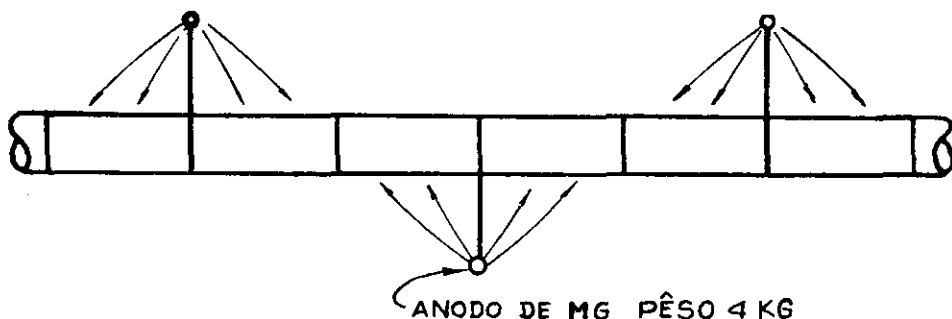
$$S = \pi 0,005 \times 1\,000 = 15,7\text{ m}^2.$$

A intensidade a se fornecer durante 10 anos será:

$$0,001 \text{ a} \times 15,7 \text{ m}^2 \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ d} \times 10 \text{ anos} = 1.375 \text{ amp/hora.}$$

Visto que 1 kg de magnésio é suscetível de fornecer cêrca de 660 amperes-hora, a quantidade a se prever para 2 tubos será de 4 kg.

A proteção consistirá pois em se ligar à canalização um anodo de 4 kg a cada 2 juntas (fig. 10). Esse anodo será ligado à canalização por um cabo isolado.



Os anodos serão colocados entre 1 a 6 m do eixo da canalização e envolvidos por um enchimento constituído de betonite (3 partes) gipso — sulfato de sódio — magnésio (cada um 1 parte). Os anodos de magnésio serão enterados de modo que a sua base fique situada no nível inferior da canalização.

Tomadas de potencial serão colocadas ao longo do traçado, de modo a se poder controlar o funcionamento da instalação.

XVI — FORMA DOS ANODOS

A liga de magnésio tendo uma densidade de 1,94, o volume do anodo deverá

ser $\frac{4}{1,94} = 2,06 \text{ dm}^3$. Se adotarmos a forma cilíndrica de 1 dm de diâmetro, sua

altura será:

$$h = \frac{2,06 \times 4}{\pi} = 2,63 \text{ dm.}$$

Levando-se em conta o volume da barra de aço sobre a qual é fundido o cilindro de magnésio, adotaremos a forma seguinte:

Diâmetro = 10 cm.
 Comprimento = 30 cm.
 Pêso de Magnésio = 4,32 kg.
 Ampéres hora práticos = 2 850.
 mA durante 10 anos = 32 mA.

As superfícies de base assim como uma altura de 2,5 cm a partir de cada base, serão pintados com uma camada de inertol, e mergulhadas em betume quente, de modo a se reduzir a área de emissão.

$$I = \frac{32 \text{ mA}}{\pi \times 1 \text{ dm} \times 2,5} = 4,07 \text{ mA/dm}^2.$$

XVII — GENERALIDADES SÓBRE A CORROSÃO

As duas grandezas que determinam as condições de equilíbrio relativas às reações possíveis de se produzirem em cada sistema são o p.H. e o potencial elétrico.

Partindo-se de considerações termodinâmicas sôbre as soluções aquosas diluídas, representa-se gráficamente os diferentes estados de sistema ferro-água (fig. 11). Este diagrama compreende três zonas:

DIAGRAMA DE CORROSÃO DO FERRO

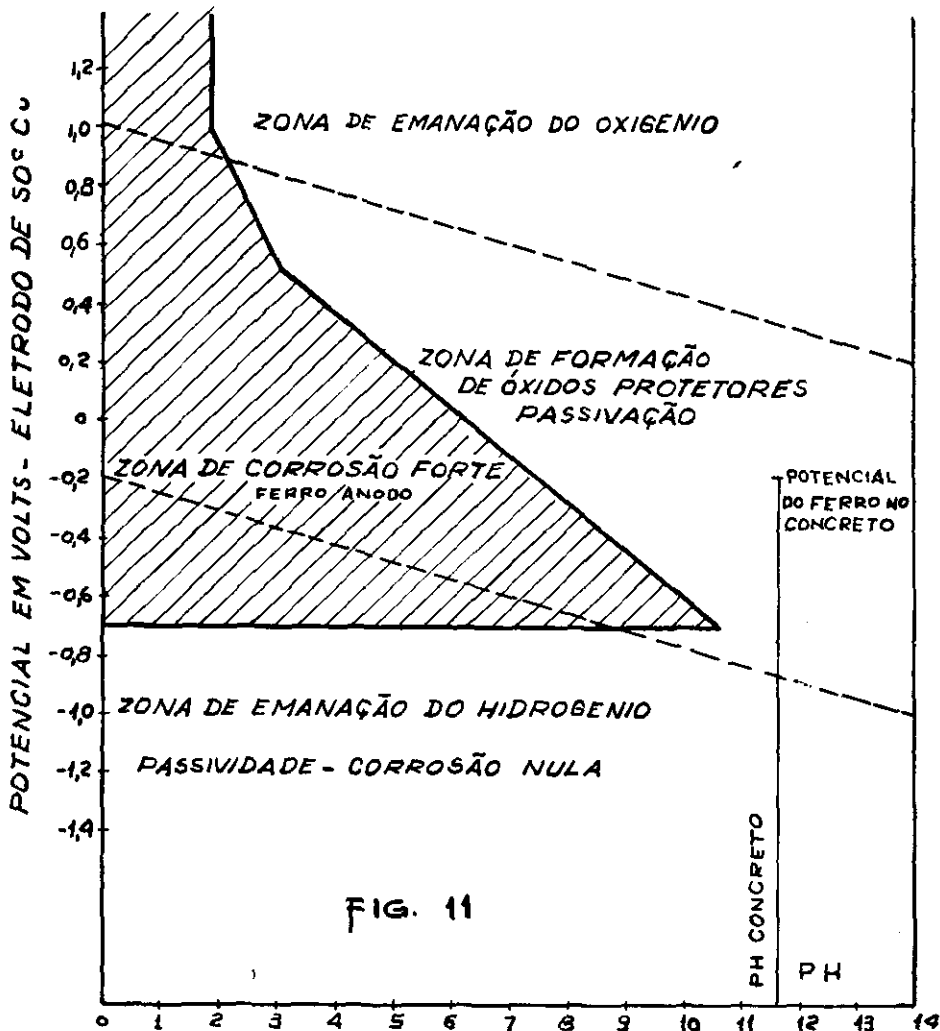


FIG. 11

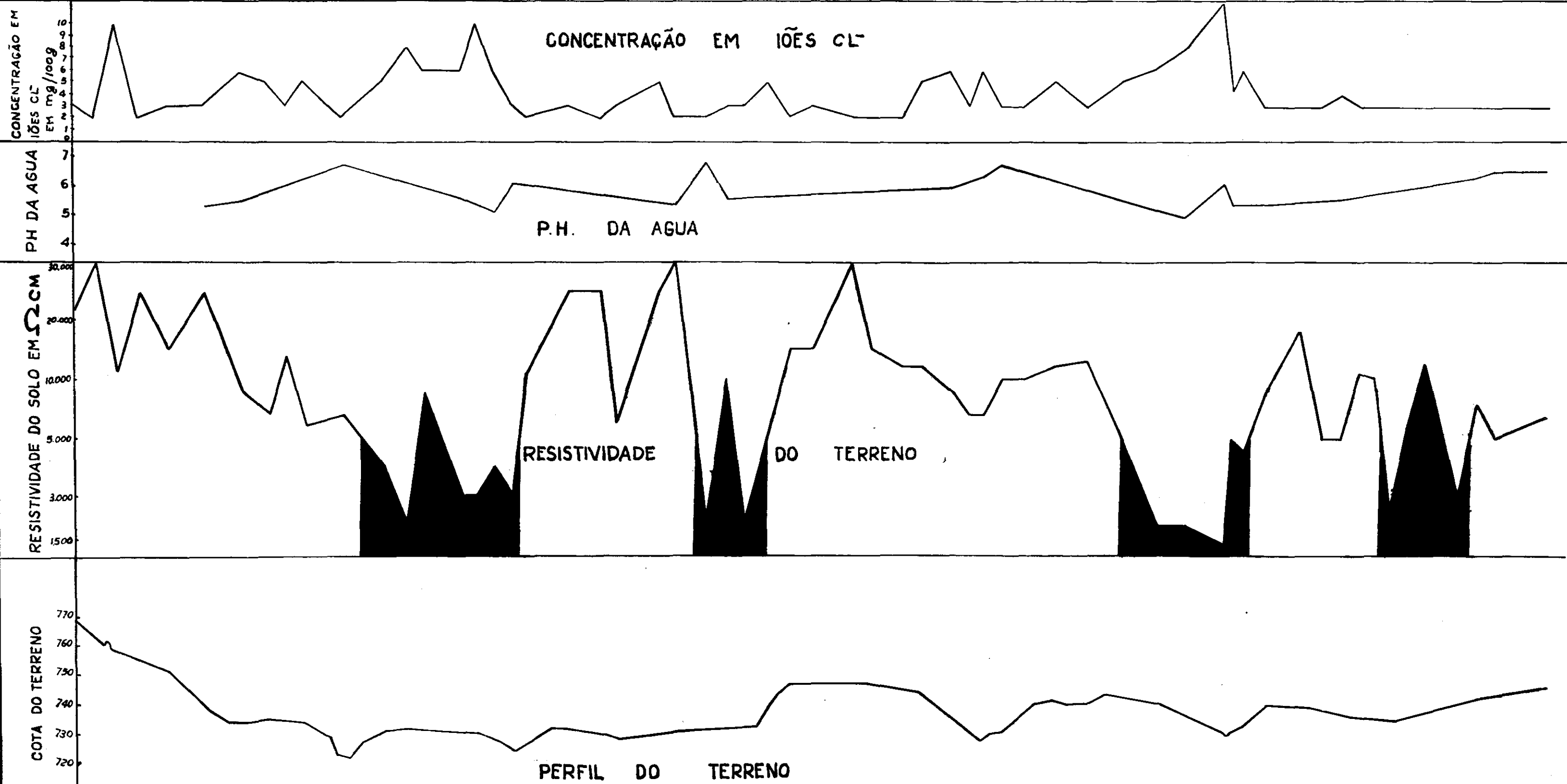


FIG. 12

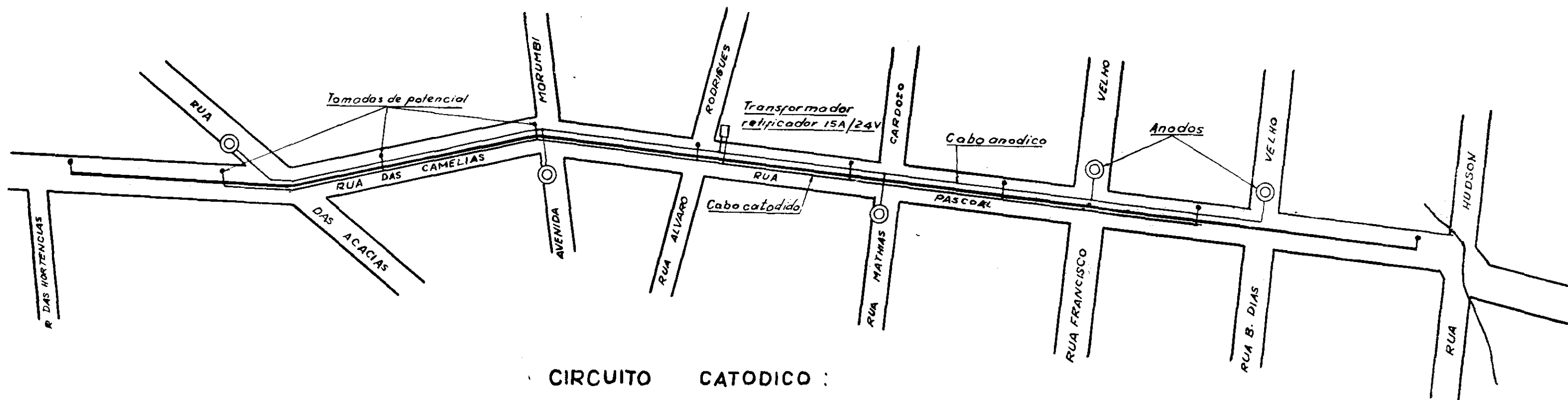
ADUTORA DE SANTO AMARO
DE CONCRETO PROTENDIDO
1ª LINHA

TRECHO - 1 -

COMPRIMENTO PROTEGIDO :- 870 m.

D. A. E.

PROTEÇÃO CATODICA



CIRCUITO CATODICO :

Comprimento do cabo catodico : 625 m

Quantidade de tomadas de potencial : 9

CIRCUITO ANODICO:

Comprimento do cabo anodico : 770 m

Quantidade de anodos : 5

FIG. 13

a) a zona achuriada, onde o ferro pode existir em solução com concentração tanto mais forte quanto mais se afastar de seus limites. É a zona de *corrosão*.

b) a zona situada sobre a de corrosão, na qual o ferro é revestido de uma camada superficial de óxido protetor, que torna a corrosão impossível se aquela fôr perfeitamente continua e não porosa (ausência de cloretos, cianuretos e tartaratos); é o domínio da *passivação*.

Para se proteger o ferro contra a corrosão, o ponto representativo ferro-água deverá situar-se:

a) na zona de passividade, abaixando-se o potencial do metal. É o que faz a *proteção catódica*.

b) na zona de passivação, elevando-se fortemente o potencial do metal ou tornando-o suficientemente alcalino.

A união ferro-cimento é do ponto de vista da corrosão, muito boa. Com efeito, o pH do complexo concreto armado, 11,6, é tal que a corrosão do ferro cessa, pois o potencial do ferro no concreto é de $-0,10$ V. Si um contacto se estabelecer entre o ferro e um eletrólito que envolve o concreto, o potencial do ferro cai.

É por isso que as medidas de potencial e pH permitem descobrir os eventuais contactos eletrólito-ferro, e o estado de corrosão destes contactos.

XVIII — CONDUTIVIDADE DA TUBULAÇÃO DE CONCRETO PROTENDIDO

A suscetibilidade de uma canalização deixar passar facilmente a corrente elétrica é um fator importante para o estudo da sua proteção contra a corrosão.

Por outro lado, para o estabelecimento da proteção catódica, seria necessário observar a resistência longitudinal da canalização. Veremos mais adiante a influência desta resistência sobre a distribuição das correntes de proteção.

As medidas de resistência longitudinal da adutora de Santo Amaro deram um valor médio de $250 \Omega/\text{km}$.

XIX — ISOLAMENTO ESPECÍFICO DA TUBULAÇÃO DE CONCRETO PROTENDIDO

Um revestimento isolante separa o metal do solo carregado de elementos corrosivos.

É pois preciso conhecer o valor da resistência desse revestimento. Vários métodos são empregados. Utilizamos o método que consiste em se colocar um anodo no solo a 20 metros da adutora; enviar uma corrente I entre o anodo e a canalização e medir em vários pontos a queda de tensão na entrada da adutora, devido à passagem da corrente I. Um elemento de adutora dl onde a tensão é V, recebe a corrente dl. Si r fôr a resistência do isolamento por unidade de comprimento, tem-se

$$V dl = r dl I$$

logo

$$\int V dl = r I.$$

O primeiro termo da equação determina-se graficamente; conhecido I (medido por ocasião do ensaio), tem-se r.

Os ensaios feitos deram um valor de $r = 60 \Omega/\text{m.l.}$

XX — OBSERVAÇÕES SOBRE A SEGURANÇA DAS OBRAS VIZINHAS

É evidente que a corrente de proteção deve ser limitada, para evitar comprometer a situação de outras obras enterradas. Abordaremos aqui somente generalidades, pois sempre se trata de casos específicos.

a) *A canalização segue ao longo de uma linha de trens eletrificados.*

Parte da corrente de volta circula na mesma. A corrente será canalizada na saída da adutora para a linha de trens por meio de uma resistência. Esta medida de segurança é denominada drenagem polarizada e realiza a proteção catódica do trecho em questão.

b) *Outras canalizações metálicas vizinhas à adutora a se proteger.*

É conveniente estabelecer conexões de equilíbrio entre as canalizações de modo a limitar a corrente que entra nas outras tubulações, e canalizar sua saída.

XXI — ESTUDO DO ESTADO ELÉTRICO DE UMA CANALIZAÇÃO SUBMETIDA À PROTEÇÃO CATÓDICA

a) HIPÓTESES:

- a) ausência de correntes vagabundas;
- b) anodos colocados a uma distância suficientemente grande para se desprezar a resistência do solo. Esta hipótese pode praticamente ser sempre satisfeita.

b) NOTAÇÕES:

- E — tensão adutora-solo em um ponto qualquer.
- I — corrente que circula na canalização no ponto acima.
- r — resistência longitudinal da canalização.
- t — resistência do seu revestimento.
- x — distância do ponto de ligação.

c) CÁLCULOS:

Como vimos os anteriormente:

$$E = E_0 e^{-x \sqrt{\frac{r}{t}}}$$

$$I = I_0 e^{-x \sqrt{\frac{r}{t}}}$$

Onde E_0 é a tensão adutora-solo no ponto de ligação, e $2I_0$ é a corrente debitada pelo anodo no mesmo ponto.

XXII — APLICAÇÃO À TUBULAÇÃO DE CONCRETO PROTENDIDO

Tendo em vista o valor da resistência longitudinal, a zona protegida por um anodo seria muito fraca, apesar da utilização de uma corrente de proteção exagerada.

É necessário reduzir essa resistência, pondo a canalização em curto circuito por meio de um fio que seria ligado a esta em cada tubo. Utilizar-se-á um fio com uma resistência de 2Ω por km.

O conjunto assim ligado comporta-se, nos pontos de contactos fio-canalização, como se a resistência longitudinal da mesma fôsse igual à do fio; mas entre êstes pontos, a distribuição da corrente se faz como si só considerassemos meio comprimento do tubo.

XXIII — ALCANCE DO ANODO

A variação máxima de tensão ao longo do tubo é:

$$e^{-x \sqrt{\frac{R}{r}}} = 0,85 \text{ v.}$$

$$x = 2,5 \text{ metros}$$

$$R = 250 \Omega/\text{km.}$$

$$r = 60 \Omega/\text{ml.}$$

As medidas de potencial feitas na 2.^a adutora mostram que o potencial mínimo é de 0,25 V. Para se obtêr 0,85 V é preciso acrescentar 0,6 V.

Conhecida a lei de distribuição da queda de tensão na entrada da adutora, e seu valor em um ponto, é possível determinar gráficamente o valor necessário para a corrente total. Assim, um anodo fornecendo 2 ampéres pode proteger um trecho de 190 m.

XXIV — DIMENSÕES DO ANODO

A resistência do anodo representa a quasi totalidade da resistência do circuito. É dada pela fórmula:

$$R = \frac{P}{2 \pi L} \left(\lg. \frac{8L}{D} - 1 \right)$$

onde R = resistência do anodo

P = resistividade do solo

L = comprimento do anodo

D = diâmetro do anodo.

Para um gerador de 12 V, a resistência de circuito será 6 Ohms.

Com um terreno com 3.000 Ω de resistividade média, o anodo terá 1,20 m de diâmetro por 1,20 m. de comprimento.

XXV — LOCALIZAÇÃO DOS ANODOS

Serão distribuídos ao longo da canalização a se proteger afastados mais ou menos 20 m da mesma.

A localização será pois função da disposição das ruas transversais à mesma. A distância entre anodos não deverá ser superior a 190.; a distância entre a extremidade do trecho e o último anodo não deverá ultrapassar 95 m.

Os anodos serão constituídos de chapa metálica (ferro) e revestidos externamente por um metal inoxidável.

XXVI — TRECHOS A SEREM PROTEGIDOS

Como vimos na seção VII os solos cuja resistividade é maior do que 5.000 Ohms/cm²/cm são pouco ou nada agressivos.

Assim sendo, na figura 12 vê-se um perfil da resistividade do terreno, no qual foram escurecidos os trechos cuja resistividade é menor do que 5.000 Ohms./cm²/cm. Nesses trechos deverá ser feita a proteção catódica da tubulação.

Esse perfil foi obtido mediante amostras de solo tiradas ao longo do traçado.

Na figura 13 vê-se um dos trechos da adutora a serem protegidos, com a localização dos anodos.

A corrente contínua necessária é obtida mediante um retificador de corrente, colocado numa caixa metálica, presa ao poste. Essa caixa deverá contêr ainda o medidor de corrente consumida, além das chaves de interrupção, etc.. Serão fechadas e retificadas mensalmente. Inicialmente o consumo de corrente será grande, mas tende a cair depois de algum tempo devido ao fenômeno de polarização, como vimos anteriormente.