

## ESTUDO DE CORRENTES DE FUGA PARA SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS EM SOLOS VERTICALMENTE ESTRATIFICADOS

#### **AUTORES**

Rooney R. A. Coelho<sup>\*</sup>, Thiago B. de F. Malheiros<sup>\*\*</sup> e José Roberto Cardoso<sup>\*</sup> <sup>\*</sup>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo <sup>\*\*</sup>SOTA – Consultoria e Projetos Ltda.

#### INTRODUÇÃO

Devido à limitação dos custos de construção e manutenção, o trilho de rolamento é frequentemente usado como parte do circuito de tração em sistemas metroferroviários [1]. O trilho tem condutividade finita e o isolamento não é completo em relação ao solo, portanto uma parte da corrente de tração fluirá para a terra por todo o trilho e retornará para a subestação de tração pelo desvio dessa corrente pelo solo, em vez de retornar à subestação de tração diretamente pelo trilho.



#### Figura 1 - Correntes em um sistema metroferroviário.

A Fig. 1 ilustra as correntes existentes no sistema metroferroviário, o sistema é alimentado em corrente contínua, sendo a corrente de tração injetada na composição através de um terceiro trilho (ou catenária), retornando para a subestação através dos



trilhos de rolamento. A figura também ilustra a corrente de fuga em um ponto específico proveniente da falta de isolação entre os trilhos de rolamento e o solo.

A corrente de fuga pode ser compreendida como um fenômeno que atua permanentemente no sistema, sendo uma função direta da resistividade elétrica do solo e dos materiais que circundam o trilho. Para [1], essa corrente pode ser reduzida ao se manter o trilho de rolamento limpo, seco e com a manutenção em dia. Uma corrente de maior magnitude pode circular no solo proveniente de um curto circuito entre o terceiro trilho (ou catenária) e a via [2], sendo essa corrente um fenômeno de regime transitório no sistema.



## Figura 2 – Corrosão devido às correntes de fuga em um sistema metroferroviário.

De acordo com [2], o fluxo contínuo de correntes de fuga pelas partes metálicas da via induz um processo corrosivo, cujos resíduos podem reduzir a resistência de isolação entre o trilho de rolamento e o solo, a qual é caracterizada por uma condutância de isolação, agravando o referido processo corrosivo.

A corrente parasita induzida pelas correntes de fuga tem um efeito corrosivo em tubulações metálicas e demais metais enterrados, do próprio sistema do metrô ou de



serviços de utilidade pública de terceiros. Tais correntes parasitas afetam também as estruturas de concreto, fazendo com que se tornem mais frágeis e levando até mesmo ao desengatamento dos vergalhões das estruturas [1].

A Fig. 2 ilustra o processo corrosivo em uma tubulação metálica devido às correntes parasitas induzidas na tubulação, que são provenientes das correntes de fuga no sistema. Tendo o solo como eletrólito, haverá uma reação de oxirredução, que oxidará o metal (região anódica), liberando íons para o solo e então corroendo o metal devido à perda desses íons. De acordo com [1], até mesmo os trilhos de rolamento do metrô e seus acessórios podem ser danificados por tais correntes. Já para a região catódica as consequências não são tão severas, todavia o acúmulo de produtos da reação química nessa região pode levar à remoção da camada de revestimento anticorrosivo da tubulação [1].

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um software para o estudo dos efeitos das correntes de fuga em sistemas metroferroviários. Para tal é possível adotar o solo como homogêneo ou utilizar um modelo mais preciso para o solo, contemplando a variação da resistividade elétrica ao longo percurso dos trilhos. Outra aplicação evidente do modelo do solo em camadas verticais são trilhos nos entornos de rios e falhas geológicas, muitas vezes dimensionados utilizando o modelo de solo homogêneo ou o modelo convencional em camadas horizontais por limitações das ferramentas existentes e pela baixa disseminação do tema na literatura especializada.

Propõe-se um modelo matemático do solo heterogêneo e sua aplicação no cálculo do potencial elétrico gerado pela corrente de fuga, tal como o potencial flutuante em



corpos metálicos próximos aos trilhos. O trabalho busca quantificar a intensidade da corrosão em estruturas metálicas, além de determinar quais regiões estão mais susceptíveis à corrosão. Essa ferramenta computacional poderá ser utilizada por técnicos e engenheiros, auxiliando nos projetos e para fins de manutenção preventiva, tal como auxiliar o dimensionamento de sistemas de proteção catódica por corrente impressa.

#### Modelo do solo estratificado em camadas verticais

Uma corrente elétrica I ao ser injetada na superfície de um solo homogêneo de resistividade elétrica  $\rho$  gera uma elevação de potencial em relação a um ponto infinitamente distante igual a

$$V = \frac{\rho I}{2\pi R},\tag{1}$$

onde R é uma distância radial partindo da origem de um sistema de coordenadas esféricas. Esta solução se dá devido a simetria de meio hemisfério do problema, onde não há necessidade de aplicar o método das imagens uma vez que a própria simetria do problema nos fornece a solução para o ar como meio isolante perfeito, não há densidade de corrente no ar e a interface entre o ar e o solo tem campo elétrico tangencial.

Tome agora a configuração da Fig. 3, onde uma fonte de corrente deslocada  $x_0$  da origem do sistema de coordenadas e situada em um meio de resistividade elétrica  $\rho_1$ , distante  $d_1$  da interface de um meio de resistividade  $\rho_2$ , que está localizado na coordenada  $H_1$  no eixo x. Para a falha vertical, com a fonte de corrente situada na superfície do solo podemos utilizar um sistema de coordenadas cilíndricas, onde o



comprimento do cilindro é coincidente com o eixo x e a fonte é coincidente com o eixo desse cilindro. A profundidade do solo é modelada como a distância radial do sistema de coordenadas, uma vez que a fonte se situa na superfície do solo, a solução é simétrica para todo o ângulo  $\phi$  desse sistema. Note que cada camada do solo é delimitada por um plano x constante, todos os planos totalmente paralelos entre si, com essa notação também é possível referenciar as camadas por coordenadas positivas ou negativas, o que é importante para o modelo a ser proposto.



# Figura 3 – Fonte de corrente situada na superfície da primeira camada de um solo com duas camadas verticais.

Com a introdução da segunda camada do solo haverá uma alteração na função potencial de solo uniforme. Faz-se necessário resolver a equação de Laplace, uma vez que todos os lugares exceto o ponto de injeção de corrente devem satisfazer essa equação. Como a solução é simétrica para todo o ângulo, em coordenadas cilíndricas, onde  $r=\sqrt{y^2+z^2}$  é a distância radial, temos que a equação pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0$$
<sup>(2)</sup>

podemos então usar o método da separação de variáveis, onde

$$V = R(r)X(x) \tag{3}$$



Substituindo essa solução na Eq. 2 e aplicando uma constante de proporcionalidade,

temos que

$$\frac{d^2R}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dR}{dr} = -\lambda^2 R \qquad e \qquad \frac{d^2X}{dx^2} = \lambda^2 X,$$
(4)

onde  $\lambda$  é a constante de proporcionalidade. Essas duas equações têm como solução

$$R = c_1(\lambda)J_0(\lambda r) \qquad e \qquad X = c_2(\lambda)e^{-\lambda x} + c_3(\lambda)e^{\lambda x},$$
(5)

onde as funções do tipo c devem ser obtidas através da aplicação das condições de contorno.

Uma vez que todas as combinações lineares (contínuas) também são soluções para a função potencial, devido ao teorema da superposição, temos que a função potencial de uma camada do solo é:

$$V(r,x) = \int_0^\infty \left[ \mathcal{F}(\lambda) e^{-\lambda x} + \mathcal{G}(\lambda) e^{\lambda x} \right] J_0(\lambda r) d\lambda$$
(6)

As funções F e G são determinadas a partir das condições de contorno. Caso a camada onde o potencial está sendo calculado seja a mesma camada de uma fonte de corrente, soma-se o efeito dessa fonte na resposta obtida. Podemos reescrever a função potencial do solo homogêneo como:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi R} \quad \therefore \quad V = \frac{\rho I}{2\pi \sqrt{r^2 + x^2}} \quad \therefore \quad V(r, x) = \int_0^\infty e^{-\lambda |x|} J_0(\lambda r) d\lambda \tag{7}$$

Podemos colocar a função potencial genérica na mesma forma do potencial gerado pela fonte pontual, facilitando assim a aplicação das condições de contorno. Convencionando como i a camada da fonte e j a camada de cálculo, caso a camada de cálculo seja a mesma camada da fonte, temos que:



$$V_{ij}(r,x) = \frac{\rho_i I}{2\pi} \int_0^\infty \left[ e^{-\lambda|x|} + \mathcal{F}_{ij}(\lambda) e^{-\lambda x} + \mathcal{G}_{ij}(\lambda) e^{\lambda x} \right] J_0(\lambda r) d\lambda$$
(8)

e caso a camada de cálculo seja diferente da camada da fonte, temos que:

$$V_{ij}(r,x) = \frac{\rho_i I}{2\pi} \int_0^\infty \left[ \mathcal{F}_{ij}(\lambda) e^{-\lambda x} + \mathcal{G}_{ij}(\lambda) e^{\lambda x} \right] J_0(\lambda r) d\lambda \tag{9}$$

A função potencial para cada camada do solo heterogêneo deve respeitar a equação de Laplace em todos os lugares, exceto no ponto de injeção de corrente, tendendo ao infinito ao se aproximar do ponto de injeção de corrente. O potencial deve ser nulo para distâncias infinitamente distantes do ponto de injeção de corrente, no caso em análise para quando x tende a  $\pm\infty$ . O potencial deve ser contínuo em cada interface entre meios diferentes, tal como continuidade da componente normal da densidade de corrente. Finalmente, como o ar é um isolante, não há densidade de corrente no ar, ou seja:

$$\left. \frac{\partial V_{ij}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \tag{10}$$

Esse termo nos leva a uma solução simétrica em torno do eixo x. Para a solução ser simétrica em relação a  $\phi$  o ponto de injeção de corrente deve se limitar a superfície do solo, caso contrário a solução necessitaria ser reformulada. Ao trabalharmos apenas com uma metade do cilindro, a simetria em relação ao ângulo é equivalente a aplicação do método das imagens, ou seja, a solução simétrica em  $\phi$  já satisfaz a condição da Eq. 10. As demais condições de contorno, para cada interface posicionada nas coordenadas x=H<sub>j</sub>, podem ser resumidas como:

$$\lim_{x \to -\infty} V_{i1} = 0 \tag{11}$$



$$V_{ij}|_{x=H_j} = V_{i(j+1)}|_{x=H_j}$$
 (12)

$$\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial V_{ij}}{\partial x} \bigg|_{x=H_j} = \frac{1}{\rho_{j+1}} \frac{\partial V_{i(j+1)}}{\partial x} \bigg|_{x=H_j}$$
(13)

$$\lim_{x \to \infty} V_{iN} = 0 \tag{14}$$

Para o modelo, convenciona-se que a camada i é a da fonte de corrente e que uma transição de camadas  $H_j$  possui camadas adjacentes  $H_j$  e  $H_{j+1}$ , a esquerda e a direita da transição. O índice i corresponde a camada da fonte e o índice j à camada de cálculo do potencial, sendo possível que a camada de cálculo seja a mesma camada da fonte de corrente. A Fig. 4 ilustra essa convenção, esse é o modelo utilizado para a determinação das funções características do solo heterogêneo.



Figura 4 – Fonte de corrente situada na superfície do solo, para uma localização variável em diversas camadas de um solo com estratificação vertical.

As equações que se referem a função potencial de uma camada qualquer do solo, podem ser reescritas em uma única expressão ao se utilizar a função delta de Kronecker, que é definida como

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{se} \quad i \neq j \\ 1 & \text{se} \quad i = j \end{cases}$$
(15)



Como feito em [3], a função potencial para a fonte deslocada  $(x_0, r_0)$  da origem, na

superfície do solo, é apresentada pela Eq. 16 a seguir.

$$V_{ij}(r,x) = \frac{\rho_i I}{2\pi} \int_0^\infty \left[ e^{-\lambda |x-x_0|} \delta_{ij} + \mathcal{F}_{ij}(\lambda) e^{-\lambda x} + \mathcal{G}_{ij}(\lambda) e^{\lambda x} \right] J_0(\lambda(r-r_0)) \ d\lambda$$
 (16)

A constante  $\rho_i I/2\pi$  posta em evidência nos permite comparar a função potencial entre duas camadas distintas analisando apenas o termo do integrando que multiplica o polinômio de Bessel, o que simplifica a aplicação das condições de contorno.



Figura 5 - Acoplamento entre dois eletrodos lineares no solo

#### Potencial elétrico de um eletrodo linear

Tomando agora um segmento de reta de comprimento L e com densidade de corrente uniforme por unidade de comprimento em vez de uma fonte pontual, podemos integrar o potencial gerado pela fonte pontual ao longo de uma trajetória entre as coordenadas  $\langle x_1, y_1, z_1 \rangle$  e  $\langle x_2, y_2, z_2 \rangle$ , que respectivamente representam seu início e fim. Utilizando notação vetorial, esse mesmo elemento pode ser descrito como delimitado por  $r_1$  e  $r_2$ . Um ponto qualquer no segmento parametrizado em u é então obtido por u $r_1 + (1 - u)r_2$  para u  $\in [0, 1]$  (cf. Figura 5).

$$V_{\text{eletrodo}}(\boldsymbol{r}) = \int_{L_1} V(\boldsymbol{r}) \, d\boldsymbol{r}$$
 (17)



Onde  $L_1$  é o segmento de reta que liga os pontos  $r_1 e r_2$ , parametrizados em  $u \in [0, 1]$ .

A corrente é adotada como uniformemente distribuída ao longo do segmento.

A elevação de potencial gerada por um segmento i na superfície de um segmento j, para uma corrente imposta em i, pode ser calculada por integração, tal como ilustra a Figura 5. Sendo o segmento j delimitado entre  $r_3$  e  $r_4$ , um ponto qualquer nesse elemento pode ser parametrizado como s $r_3 + (1 - s)r_4$  para s  $\in [0, 1]$ . A razão entre a elevação de potencial no segmento j pela corrente que gerou essa elevação (proveniente do segmento i) é conhecida como a resistência mútua entre segmentos e é dada pela seguinte integração numérica.

$$R_{ij} = \frac{1}{I_i} \int_{L_2} V_{\text{eletrodo}}(\boldsymbol{r}) \, d\boldsymbol{r}$$
(18)

Onde  $L_2$  é o segmento de reta que liga os pontos  $r_3$ e  $r_4$ , parametrizados em  $s \in [0, 1]$ . ou seja, a influência do condutor i em uma trajetória parametrizada para o condutor j. Como os eletrodos são formados por uma superfície condutora, sabe-se que essa é equipotencial, sendo também esses condutores interligados, ambos estarão sob o mesmo potencial. Aplicando o teorema da superposição é possível determinar a corrente em cada eletrodo de tal forma que se tenha a condição de equipotencialidade. Uma vez conhecida a corrente em cada eletrodo, o potencial elétrico em um ponto qualquer do espaço é calculado pela superposição da Eq. 17 para cada eletrodo do sistema. A resistência mútua entre segmentos é utilizada para a determinação da distribuição de corrente nos eletrodos.



#### Modelo de eletrodos ativos

A elevação de potencial  $V_0$  calculada em um segmento i é a superposição do efeito de todos os N segmentos nesse elemento. Pode-se usar o conceito de resistência mútua entre condutores para escrever a Eq. 19, que é uma expressão para o potencial elétrico  $V_0$  em um segmento ativo.

$$\sum_{j=1}^{N} R_{ij} I_j = V_0 \qquad \text{ou} \qquad \sum_{j=1}^{N} R_{ij} I_j - V_0 = 0$$
(19)

O modelo do eletrodo ativo tem como base a equação da continuidade, tal como descrita em [4]. Para esses elementos impõe-se que a soma das correntes é igual à corrente injetada, ou seja, a corrente de falta ou a corrente de fuga.

#### Modelo de eletrodos passivos

O potencial flutuante  $V_p$  no eletrodo passivo k é calculado como a superposição do efeito de todos os segmentos nesse elemento, tanto ativos ( $N_a$ ) como passivos ( $N_p$ ).

$$\sum_{j=1}^{N_a+N_p} R_{kj}I_j = V_p \quad \text{ou} \quad \sum_{j=1}^{N_a+N_p} R_{kj}I_j - V_p = 0$$
(20)

Pode-se generalizar essa ideia para m eletrodos passivos, cada qual eletricamente isolado dos demais. Assim se tem uma expressão similar para cada eletrodo desse tipo.

Para o modelo dos eletrodos passivos, diferente do realizado para eletrodos ativos, as correntes que fluem pelo eletrodo podem assumir valores negativos, contanto que a soma das correntes seja nula. Para uma melhor representação da distribuição de correntes nesses elementos faz-se necessário realizar uma segmentação apropriada dos eletrodos.



$$\oint \boldsymbol{J} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \sum_{k=1}^{N_p} I_k = 0 \tag{21}$$

A resistência mútua é obtida pela razão entre o potencial  $V_p$  no eletrodo passivo e a corrente total  $I_{cc}$  que foi injetada no sistema. A resistência de aterramento do sistema é obtida pela razão entre o potencial  $V_0$  nos eletrodos e a corrente total  $I_{cc}$  que foi injetada no sistema.



Figura 6 – Passagem da corrente pelo eletrodo passivo gerando um potencial flutuante

#### Obtenção da distribuição de correntes

Uma vez modelados os eletrodos lineares, distinguido os ativos, onde há uma injeção de corrente, dos passivos, cujo potencial é flutuante, é possível determinar a distribuição de correntes no sistema. Para tal, adapta-se neste artigo os modelos de [5] e [6], introduzindo múltiplos elementos passivos, cada qual eletricamente isolado dos demais.



$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{1k}$	$R_{1n}$	-1	0	 0		$I_1$		0	
$R_{21}$	$R_{22}$	$R_{23}$	 $R_{2k}$	 $R_{2n}$	-1	0	 0		$I_2$		0	
$R_{31}$	$R_{32}$	$R_{33}$	$R_{3k}$	$R_{3n}$	-1	0	 0		$I_3$		0	
	÷		÷	÷	÷	÷	:		÷		:	
$R_{k1}$	$R_{k2}$	$R_{k3}$	 $R_{kk}$	 $R_{kn}$	0	-1	 0		$I_k$		0	(22)
	÷		÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	=	:	
$R_{n1}$	$R_{n2}$	$R_{n3}$	 $R_{nk}$	 $R_{nn}$	0	0	 -1		$I_n$		0	
1	1	1	0	 0	0	0	 0		$V_0$		$I_{cc}$	
0	0	0	 1	 0	0	0	 0		$V_{p1}$		0	
	÷		÷	÷	÷	÷	÷		:		÷	
0	0	0	 0	 1	0	0	 0		$V_{pm}$		0	

Toma-se  $V_0$  como o potencial nos eletrodos ativos e  $V_{pk}$ , para k variando de 1 a m, como o potencial em cada um dos eletrodos passivos. A distribuição das correntes que fluem para o solo através de cada eletrodo, tal como a elevação de potencial é obtida simultaneamente por um sistema de equações lineares. A Equação 22 apresenta o sistema linear a ser solucionado.

Note que para a formação do vetor b somente o termo n+1 é não nulo e igual à corrente injetada no sistema. Com a solução da Eq. 22 obtém-se simultaneamente todas as correntes e elevações de potencial nos eletrodos, tanto ativos quanto passivos. Cada eletrodo passivo é composto por uma associação de segmentos sob o mesmo potencial flutuante, ou seja, há m potenciais flutuantes e um agrupamento de eletrodos para cada um deles. Caso o eletrodo passivo seja segmentado, calcula-se uma corrente para cada segmento, aumentando a ordem do sistema. Obviamente as linhas do sistema podem ser permutadas, todavia optou-se por fazer dessa forma, sistematizando a interpretação dos eletrodos ativos e passivos.



### 25<sup>ª</sup> SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 6º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

#### Corrosão causada pela corrente de fuga

A Figura 7, que foi adaptada de [7], ilustra as correntes em um sistema ferroviário. A corrente de tração I flui da fonte para o trem e retorna pelo trilho  $I_1$ . As ligações entre trilhos constituem uma resistência em série, como os trilhos também repousam sobre dormentes de madeira ou concreto que estão em contato com o solo, que embora seja uma alta resistência, constituem uma resistência em paralelo [7], acarretando uma corrente que se dispersa para o solo  $I_2$  onde deveria estar limitada aos trilhos.



#### Figura 7 - Ilustração das correntes no sistema ferroviário e mecanismo de corrosão.

Se nas proximidades do trilho existir um elemento metálico, como uma tubulação, a corrente elétrica I<sub>3</sub> fluirá preferencialmente por ela ao invés do solo. A corrente de sentido convencional entra no corpo metálico formando uma região catódica (C e C') isenta de corrosão, todavia ela sai do corpo metálico para o solo formando uma região anódica (A e A') que está sujeita a corrosão. De acordo com [7], a corrosão nos trilhos (A) não gera muita preocupação, uma vez que esses podem ser substituídos além de esse valor estar distribuído ao longo de sua extensão. A corrosão gerada em tubulações, gera muita preocupação pela possibilidade de perfuração e vazamento de



produto. O mesmo problema ocorre em sistemas de aterramento de subestações próximas, que é o tema do estudo de caso deste trabalho, uma corrente unidirecional gera corrosão nos cabos de cobre, necessitando de uma complexa manutenção para a substituição dos condutores enterrados.



#### Figura 8 – Circuito equivalente para as correntes no sistema ferroviário

A Figura 8 ilustra o circuito equivalente para a corrente de fuga. A corrente elétrica que alimenta o trem deveria retornar por  $R_{\rm Trilho}$ , porém a isolação entre o trilho e o solo não é perfeita e há uma parcela de corrente de fuga que depende da resistência de aterramento do trilho  $R_{\rm Aterramento}$ . quanto maior essa resistência melhor o isolamento e menor é a corrente de fuga, esta resistência contempla a associação série entre a resistência de isolamento trilho-solo e a resistência de aterramento do trilho. Um sistema coletor de corrente de fuga é uma baixa resistência em paralelo a este circuito, o que reduz a corrente que se dispersa no solo. Quando há um corpo metálico enterrado próximo ao trilho, há uma resistência mútua entre este e o trilho, caracterizado por  $R_{\rm Eletrodo}$ , a qual é percorrida por uma parcela da corrente que se



dispersou do trilho. Quando este corpo metálico é percorrido por uma corrente elétrica contínua haverá um efeito corrosivo no corpo metálico devido à fuga de corrente do trilho, tal efeito é função da magnitude da corrente induzida, do material metálico, de sua geometria e do tempo de exposição.

O controle de corrente de fuga geralmente é feito através de melhorias realizadas para os sistemas de transporte ou estruturas aterradas vizinhas. O aumento da resistência elétrica entre o trilho e o solo é um método muito eficaz na redução de correntes de fuga. O aumento dessa resistência reduz a tendência da corrente de retorno fluir em qualquer caminho que não seja os trilhos. Para [8], outros métodos para evitar corrosões incluem proteção catódica, isolamento de trilhos, aumento da tensão do sistema de tração, emprego de trilhos diferenciados com resistência elétrica muito baixa e uso de sistemas de aterramento apropriados nas subestações de tração.

A manutenção regular do isolamento entre o trilho e o solo, como a remoção de sujeira, é necessária para garantir que não haja diminuição da resistência e risco resultante para o sistema ferroviário ou infraestrutura de terceiros [9]. O modelo para corrente de fuga utilizada neste artigo é como uniforme, o que é ideal para uma curta extensão dos trilhos. Para contemplar trilhos longos é comumente utilizado um modelo de linha de transmissão com circuitos RL em cascata [1].

Quando os trilhos são solidamente aterrados há uma maior corrente de fuga e uma maior corrosão, para este fim geralmente se usa um sistema coletor para correntes de fuga, que são malhas de aterramento na fundação dos trilhos, as quais geram um percurso de baixa resistência para as correntes de fuga, que fluirá em menor

16



proporção ao solo, protegendo tanto os trilhos como as estruturas metálicas vizinhas de corrosão.

#### Quantificação da corrosão eletrolítica

Em geral, a massa de metal oxidado ou corroído na área anódica pode ser calculado usando-se a relação quantitativa que existe entre a quantidade de corrente que passa através de um eletrólito e a massa do material que é oxidado ou reduzido nos eletrodos [7]. Essa relação quantitativa é a lei de Faraday e pode ser expressa por

$$M = KIt \tag{23}$$

Onde M é a massa do metal que reage, K é o equivalente eletroquímico, fornecido na Tabela 1, I é a intensidade de corrente em ampère e t é o tempo em segundos. A coluna Massa da tabela é o resultado do cálculo da massa consumida anodicamente pela passagem de 1 A de corrente durante um ano, tanto para o ferro, como para o cobre.

Metal	Reação Anódica	Equivalente Eletroquímico	Massa (kg)		
Fe	$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$	$\frac{55,85}{2}$	9,125		
Cu	$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e$	$\frac{63,57}{2}$	10,390		

Tabela 1 -	Consumo	anódico	de	metal

Para o nosso estudo, o ferro é o metal corroído pela corrente de fuga nos trilhos, ponto A da Figuras 7, e o cobre e o metal corroído pela corrente de fuga na malha de



aterramento de uma subestação próxima, ponto A' da mesma figura. O produto da

região catódica dependerá da acidez e aeração do meio e se depositará sobre o metal.

#### DIAGNÓSTICO

Este artigo utiliza um estudo de uma subestação localizada em um município da região metropolitana de São Paulo, vizinha a uma linha férrea. São analisadas características da malha de aterramento da Subestação de 138 / 13,8 kV, antes e após atividades de reparos a que foi submetida. O reparo foi motivado ao se constatar que o valor da resistência de aterramento da malha de aterramento estava muito acima de seu valor na ocasião da instalação. O valor alto de resistência de aterramento medido, levantou a hipótese de que poderia haver deterioração da malha.



# Figura 9 – Ilustração da malha de terra da subestação e sua proximidade com uma linha de trem

Uma vez que a referida subestação está do lado de uma linha férrea, uma causa latente de tal deterioração é a passagem de corrente contínua, induzida pelo sistema ferroviário.



Durante a inspeção da subestação se constatou que não somente havia um alto valor de resistência de aterramento, mas os potenciais elétricos na superfície da malha também estavam bastante elevados, sendo que muitos equipamentos estavam totalmente desconectados, ou muito mal conectados, indicando fortes irregularidades no sistema de aterramento. Também se constatou a presença de corrente contínua circulando entre solo, condutores da malha e condutores aéreos de proteção contra descargas. A hipótese de irregularidades que foi comprovado por inspeção amostral em pontos notáveis como o do Transformador de Serviço Auxiliar(TRSA), disjuntores de 13,8 kV, chaves de 138 kV, para-raios e pórticos de entrada da Linha de Transmissão (LT) de 138 kV, através de um relatório fotográfico.



# Figura 10 – Configuração da malha de terra junto à disposição dos equipamentos elétricos.

A Figura 11 ilustra a alta corrosão no aterramento do TRSA, cujo condutor original era de 70 mm<sup>2</sup>. Este equipamento está na região inferior direita da malha. De acordo com as medições realizadas este equipamento estava fora da malha de aterramento, ou seja, a conexão do equipamento com a malha foi interrompida devido a deterioração.









A Figura 12 ilustra a corrosão no aterramento dos transformadores TR-1 e TR-2, estes equipamentos estão na região central da malha. Os transformadores não tiveram os cabos corroídos a ponto de estarem desconectados à malha, ou seja, sofreram uma corrosão menos intensa que os equipamentos na região inferior da malha, tal comos disjuntores e o TRSA. Tais equipamentos sofreram uma corrosão tão intensa que em grande parte não apresentaram continuidade elétrica com a malha.



(b)

(c)

Figura 12 – Corrosão em TR-1 (a) Equipamento (b) Condutor (c) Cruzamento.

Foi utilizado um amperímetro de corrente contínua para se obter a corrente CC que está circulando pela malha, o valor médio das leituras foi de 1,549 A. Note que esta corrente está atuando permanentemente na malha de aterramento, distribuída entre seus condutores, o que ocasiona um processo corrosivo. De acordo com [7], uma

(a)



corrente CA, que também flui permanentemente para o neutro aterrado do transformador devido a desequilíbrios na carga, não ocasiona corrosão significativa.

A subestação analisada foi reformada com o intuito de substituir os cabos deteriorados para fazer com que os equipamentos possam atuar devidamente e com a devida proteção para os operadores da subestação.



(a)

(b)

Figura 13 – Condutores após a reforma (a) Cruzamento (b) Rabicho para conexão da malha de terra com equipamentos.

A Figura 13 mostra os condutores após a reforma, retomando sua aparência de antes da corrosão. Após a reforma, a malha que estava com resistência de aterramento acima de 5  $\Omega$ , passou após a reforma para 1,5  $\Omega$ , o que ilustra que haviam muitos cabos sem continuidade elétrica devido ao processo corrosivo.

#### ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base na configuração da malha de aterramento, das características do solo, da localização da linha férrea e da disposição dos equipamentos, é possível aplicar o modelo apresentado neste artigo para analisar os efeitos corrosivos na malha de aterramento da subestação, induzida por uma corrente de fuga do sistema ferroviário.



#### 25<sup>ª</sup> SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 6<sup>°</sup> PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A simulação realizada nos permite determinar de antemão quais equipamentos serão mais afetados pela corrosão e também quantificar a perda anual de cobre em função da corrente de fuga, o que possibilita uma manutenção preventiva da subestação.

O resultado da estratificação do solo em camadas horizontais resultou em uma primeira camada com uma considerável profundidade, portanto para a simulação deste artigo optou-se por utilizar um modelo de solo homogêneo, com resistividade elétrica de 250  $\Omega \cdot m$ . A corrente de fuga nos trilhos foi considerada como uniforme e seu valor foi ajustado de para que se induza uma corrente de 1 A na malha de aterramento, que está sob um potencial flutuante.



# Figura 14 – Resultado da simulação para corrosão eletrolítica nos condutores da malha de aterramento da subestação.

A Figura 14 apresenta o resultado da simulação desenvolvida para a circulação de 1 A de corrente CC na malha de aterramento durante um ano. A figura apresenta somente a região anódica, sendo a catódica colocada como zero, uma vez que não perderá



massa. O efeito corrosivo é linearmente proporcional a essa corrente, portanto o efeito de qualquer valor de corrente de fuga pode ser obtido a partir desse resultado. Para a subestação estudada a leitura da corrente CC circulando na malha foi de aproximadamente 1,5 A, portanto a perda de cobre é 50% maior que a escala apresentada. Para se quantificar a massa total de cobre perdida em cada segmento é necessário a integralização desse valor ao longo de seu comprimento. Pode-se observar que as regiões mais afetadas pela corrosão observada em campo, disjuntores e TRSA, são regiões anódicas com escala similar à região do transformador, porém com conexões mais curtas, sendo a perda de massa muito concentrada. Os transformadores TR-1 e TR-2, mais ao centro da malha possuem uma perda de massa distribuída em um cabo de conexão longo, o que resultou em uma perda de massa distribuída. Mesmo após a troca dos condutores é ideal que se mitigue esses efeitos corrosivos, o que pode ser obtido através de ânodos de sacrifício (para solos com baixa resistividade elétrica) ou proteção por corrente impressa (para solos de alta resistividade) [10]. O programa desenvolvido, embora em estágio de protótipo, é capaz de estabelecer o nível de corrente impressa para o sistema de proteção através de simulações computacionais.

#### CONCLUSÕES

O equacionamento desenvolvido neste trabalho possibilita o cálculo de potenciais elétricos em meios homogêneos e também com falhas verticais, tal como a distribuição de correntes de fuga nas imediações de rios, o que ocorre na capital paulista. O equacionamento apresentado também possibilita um cálculo preciso de



potenciais gerados pela corrente de fuga em longos percursos contemplando a variação das propriedades elétricas do solo.

O trabalho apresenta de forma sucinta o mecanismo de corrosão eletrolítica gerado pela corrente de fuga em corpos metálicos próximos, onde a corrente que flui pelo solo escolherá preferencialmente o metal para se dissipar por ser um caminho de menor resistência. O trabalho mostra que a corrente de fuga sai dos trilhos causando corrosão no ferro e também sai do corpo metálico de potencial flutuante causando corrosão, no caso do trabalho, em cabos de cobre de uma subestação próxima.

O trabalho utiliza dados reais e recentes de uma reforma de uma subestação nas imediações de uma linha de trem, que havia fortes indícios de corrosão devido a uma elevação em sua resistência elétrica inicial. Medições de continuidade indicaram diversos equipamentos desconectados da malha de aterramento. Durante a troca de cabos da malha foi constatado que estes estavam corroídos a ponto de desconectar determinados equipamentos da malha de aterramento. Com o auxílio de um amperímetro CC constatou-se uma corrente contínua atuando permanentemente na malha de aterramento, distribuída entre seus condutores, o que ocasiona um processo corrosivo. Os equipamentos desconectados da malha têm sua atuação prejudicada, geram riscos muito grandes para os operadores da subestação, tal como interferem no bom funcionamento do sistema elétrico de potência em geral.

O artigo apresenta um programa baseado no equacionamento desenvolvido para quantificar a corrosão em corpos metálicos próximos a sistemas ferroviários devido a corrente de fuga. A corrente de fuga para este estudo foi simplificada como



uniformemente distribuída ao longo da extensão dos trilhos. Através do layout da subestação e da localização dos trilhos do sistema ferroviário o programa quantificou a massa de cobre perdida anualmente por ampère de corrente de fuga, tornando possível conhecer de antemão os equipamentos mais atingidos pela corrosão e determinar o tempo necessário para a manutenção do sistema de aterramento da subestação.

O método apresentado neste artigo é aplicável a cálculos de corrosão em tubulações metálicas, como de petróleo e gás, e também em estruturas de concreto causadas pela corrente de fuga. O cálculo do processo corrosivo é específico para cada geometria de corpos metálicos, configurações do solo e localização espacial dos trilhos do sistema ferroviário. Este trabalho consta de um projeto inicial, pretende-se estendê-lo não somente à quantificação da corrosão, mas também estratégias de mitigação do processo corrosivo por meio de projeto específico.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- C. Wang, "Stray Current Distributing Model in the Subway System: A review and outlook," Int. J. Electrochem. Sci., vol. 13, pp. 1700–1727, 2018, doi: 10.20964/2018.02.16.
- J. A. P. da Silva, J. R. Cardoso, C. R. Guirelli, and L. N. Rossi, "Uma Formulação Íntegro-Diferencial de 4a. Ordem Aplicada à Simulação de Sistemas de Aterramento Metro-Ferroviários," SBA Control. Automação, vol. 10, no. 3, pp. 176-182, 1999, [Online]. Available: <u>http://www.sba.org.br/revista/vol10/V10A234.pdf</u>.
- [3] COELHO, Rooney Ribeiro Albuquerque. Uma contribuição à análise de sistemas de aterramento em meios horizontalmente estratificados. 2019 Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 2019. Disponível em: <u>http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2045</u>



- [4] J. R. Cardoso, *``Engenharia eletromagnética''*, 1st ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- [5] M. L. Pereira Filho, "Aplicação do método das imagens complexas ao cálculo de malhas de aterramento em solos com estratificação horizontal," Escola Politécnica, Universidade de São Paulo- USP, 1999.
- [6] A. N. Aleixo, "Análise simultânea de sistemas de aterramento e distribuição de corrente de curto-circuito," Escola Politécnica, Universidade de São Paulo- USP, 2002.
- [7] V. Gentil, *Corrosão*, 6th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- [8] M. A. Sandidzadeh, "Controlling and Simulation of Stray Currents in DC Railway by Considering the Effects of Collection Mats," A. S. E.-X. Perpinya, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2012, p. Ch. 9.
- [9] I. Cotton, C. Charalambous, P. Aylott, and P. Ernst, "Stray current control in DC mass transit systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 2, pp. 722–730, 2005, doi: 10.1109/TVT.2004.842462.
- [10] G. Kindermann and J. M. Campagnolo, Aterramento elétrico, 6th ed. Sagra-DC

Luzzatto, 2011.