

RICARDO AUGUSTO B. P. DE MELLO

**RECOMENDAÇÕES DE PROJETO DE VIA PERMANENTE PARA
MINIMIZAÇÃO DE CORRENTE DE FUGA E CORROSÃO
ELETROLÍTICA EM SISTEMAS METROVIÁRIOS COM TRAÇÃO
ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA: TRILHO DE ROLAMENTO,
4º TRILHO E PÁTIO**

SÃO PAULO

2016

RICARDO AUGUSTO B. P. DE MELLO

**RECOMENDAÇÕES DE PROJETO DE VIA PERMANENTE PARA
MINIMIZAÇÃO DE CORRENTE DE FUGA E CORROSÃO
ELETROLÍTICA EM SISTEMAS METROVIÁRIOS COM TRAÇÃO
ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA: TRILHO DE ROLAMENTO,
4º TRILHO E PÁTIO**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
certificado de especialização em Tecnologia
Metroferroviária – PECE/USP.

SÃO PAULO
2016

RICARDO AUGUSTO B. P. DE MELLO

**RECOMENDAÇÕES DE PROJETO DE VIA PERMANENTE PARA
MINIMIZAÇÃO DE CORRENTE DE FUGA E CORROSÃO
ELETROLÍTICA EM SISTEMAS METROVIÁRIOS COM TRAÇÃO
ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA: TRILHO DE ROLAMENTO,
4º TRILHO E PÁTIO**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do certificado de especialização em tecnologia metroferroviária – PECE / USP.

Área de Concentração:
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia

Orientador:
Prof. Dr. Mario Leite Pereira Filho

SÃO PAULO

2016

Catalogação-na-publicação

Mello, Ricardo Augusto B. P.

Recomendações de projeto de via permanente para minimização de corrente de fuga e corrosão eletrolítica em sistemas metroviários com tração elétrica em corrente contínua: trilho de rolamento, 4º trilho e pátio / R. A. B. P. Mello -- São Paulo, 2016.

37 p.

Monografia (Especialização em Tecnologia Metroferroviária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Corrente de Fuga 2. Trilho de Rolamento 3. Quarto Trilho I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

RESUMO

A preocupação com as correntes de fuga existe desde o início das instalações de bondes nos Estados Unidos, mesmo com a inclusão do avanço tecnológico, os métodos, conclusões e afirmações realizadas a respeito de controle de corrente de fuga, no início do século XX, ainda são utilizados pelas empresas provedoras de sistemas de transporte ferroviário.

Este trabalho objetiva a elaboração de recomendações de projeto de via permanente com foco na abordagem do trilho, interligação entre trilhos (*track-to-track-cross bond*), 4º trilho e pátios de manutenção para minimização de corrente de fuga e corrosão eletrolítica em sistemas metroviários com tração elétrica em corrente contínua. Além disso, serão apresentados os registros dos danos causados por corrente de fuga em uma linha de transporte metroviário da cidade de São Paulo, ilustrando e exemplificando os riscos gerados a partir deste problema, e que poderiam ser minimizados, ou ainda evitados, através das recomendações apresentadas neste trabalho, a serem consideradas na fase de concepção de projeto.

A metodologia utilizada para atingir o objetivo proposto, envolve: (i) a análise das normas existentes e praticadas pelas principais operadoras de metrôs no mundo. Utilizaram-se também registros e experiências dos problemas ocasionados por corrente de fuga na pesquisa bibliográfica realizada; (ii) o levantamento em campo para obtenção de registros dos problemas ocasionados pela corrente de fuga.

A partir da metodologia realizada foram apresentados os dados coletados no levantamento realizado nas linhas metroviárias da cidade de São Paulo, além da síntese de recomendações de projeto.

Este trabalho é uma síntese compilada a partir de Mello e Kise (2016), que apresenta uma abordagem de maior âmbito sobre o tema de minimização de corrente de fuga em sistemas em sistemas metroviários com tração em corrente contínua.

Palavra-chave: Corrente de fuga. Corrosão Eletrolítica. Aterramento. Via permanente.

ABSTRACT

The concern about leakage currents exist since the beginning of trams facilities in United States, even with the inclusion of technological advances, methods, conclusions and statements made in respect of leakage current control, in the early twentieth century, they are also used by companies providing rail systems.

This document has the objective of create design recommendations to the track with an approach focusing the rail, track-to-track-cross bond, 4th rail and the maintenance yard, in order to minimize leakage current and electrolytic corrosion in subway systems with DC traction power supply. In addition, it will be presented registers of the damage caused by leakage current in a subway transportation line of São Paulo, illustrating and exemplifying the risks generated from this problem, and how those risks could be minimized or avoided through the recommendations in this document, applied in the conception design phase.

The methodology used to achieve the proposed objective, involve: (i) the analysis of existing standards and practiced by the major operators of metros in the world. It was used also records and experience of the problems caused by leakage current in the literature survey; (ii) the field survey to obtain records of the problems caused by the leakage current; (iii) measurements to detect the low electrical insulation points on the track, carried out through visits to subway facilities.

From the methodology performed were presented the data collected in the survey conducted in the subway lines, and the synthesis of design recommendations.

This document is a compilation synthesis from Mello e Kise (2016), which presents a bigger approach about the leakage current issue in subways with DC traction power supply. This document is focused in the rail, track-to-track-cross bond, 4th rail and maintenance yard.

Keywords: Leakage current. Stray current. Electrolytic corrosion. Earth. Ground. Railway track.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	6
2.	ESTADO DA ARTE.....	8
2.1.	CONTEXTO HISTÓRICO.....	8
2.2.	TRILHOS COMO CIRCUITO DE RETORNO.....	9
2.3.	TENSÃO DE TOQUE	10
2.4.	CORRENTE DE FUGA E CORROSÃO ELETROLÍTICA	11
2.5.	VIA PERMANENTE	13
2.6.	TRILHOS	14
3.	METODOLOGIA	16
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
4.1.	ABORDAGEM GERAL	17
4.2.	REGISTROS DOS EFEITOS DA CORRENTE DE FUGA.....	17
4.3.	RECOMENDAÇÕES DE PROJETO	20
4.3.1.	Trilho de rolamento	20
4.3.2.	Ligaçāo entre trilhos (<i>track-to-track-cross bond</i>).....	22
4.3.3.	4º (quarto) trilho.....	24
4.3.4.	Sistema de tração em pátios de manutenção	28
5.	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS.....	33

1. INTRODUÇÃO

Em sistemas de tração metroviários, normalmente o trilho de rolamento é utilizado como retorno da corrente proveniente das subestações retificadoras (PIRES, 2013). A baixa isolação elétrica entre o trilho de retorno e o terra resulta no desvio de parte desta corrente para solo, que a conduz à subestação elétrica através de conjuntos de elementos metálicos que o compõem, tais como armaduras das estruturas, canos metálicos e instalações elétricas. A esta corrente, desviada dos trilhos de rolamento para o solo, dá-se o nome de corrente de fuga (BAHRA; CATLOW, 1995). A Figura 1 ilustra o processo descrito.

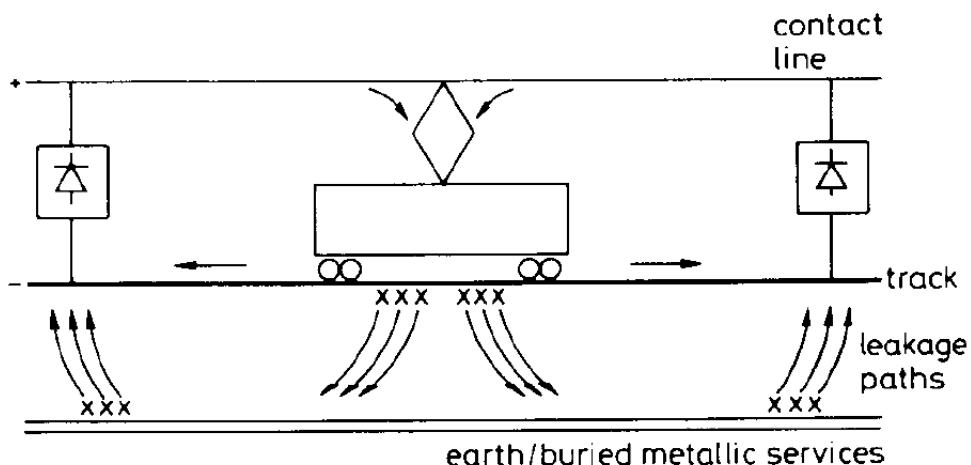


Figura 1 – Processo de corrente de fuga. Fonte: Brunton (1989)

O trilho de rolamento e os elementos metálicos envolvidos no processo formam eletrodos assim como o solo, um eletrólito. O ponto onde a corrente entra na estrutura condutora é conhecido como zona catódica e a região de saída da corrente através do solo para outra estrutura ou para retornar à subestação retificadora é denominada região anódica. Nesta última, ocorrerá o processo de corrosão no sistema galvânico formado e poderá colocar esta estrutura em risco (BAHRA; CATLOW, 1995).

A interferência e efeitos corrosivos da corrente de fuga oriunda das correntes de retorno do sistema de tração DC apresentam-se como problema para os operadores de

sistemas metroviários e sistemas de utilidades públicas desde o final do século XIX (BRUNTON, 1989).

Este trabalho objetiva a síntese de recomendações normativas de projeto de via permanente com foco na abordagem do trilho, interligação entre trilhos (*track-to-track-cross bond*), 4º trilho e pátios de manutenção, para minimização de corrente de fuga e corrosão eletrolítica em sistemas metroviários com tração elétrica em corrente contínua. Além disso, serão apresentados os registros dos danos causados por corrente de fuga e suas medições em uma linha de transporte metroviário da cidade de São Paulo, ilustrando e exemplificando os riscos gerados a partir deste problema, e que poderiam ser minimizados, ou ainda evitados, na fase de projeto.

A metodologia utilizada para atingir o objetivo proposto, envolveu a análise das normas existentes e praticadas nos principais países e regiões do mundo. Os registros dos problemas ocasionados por corrente de fuga, e suas medições serão realizados através de visitas às instalações metroviárias. A metodologia será tratada com detalhes no capítulo 3.

De acordo com a IEC 62128-2 (2013), sistemas que apresentam corrente de tração em corrente alternada não apresentaram ao longo dos anos efeitos de corrosão evidentes, porém a mesma ressalta que ainda há estudos em andamento ainda não completados.

A presente monografia limita-se à aplicação em sistemas metroviários com sistema de tração em corrente contínua, portanto não se estende a sistemas ferroviários, ou sistemas de tração em corrente alternada.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. CONTEXTO HISTÓRICO

A preocupação com as correntes de fuga existe desde o início das instalações de bondes nos Estados Unidos, nelas enterravam-se elementos metálicos que eram pontualmente conectados ao trilho, garantindo o retorno da corrente mesmo com os trilhos interrompidos. Em 1892, constatou-se que a corrente de fuga representava de 25 a 40% do valor da corrente de retorno, e ainda causavam uma diferença de potencial entre os canos de água e de gás (BLONDEL; DUBOIS, 1898).

Segundo Memon e Fromme (2014), mesmo com a inclusão do avanço tecnológico, os métodos, conclusões e afirmações realizadas, a respeito de controle de corrente de fuga, no início do século XX, ainda são utilizados pelas empresas provedoras de sistemas de transporte ferroviário. Os autores complementam que foram criadas regulações no Reino Unido desde 1894, França desde 1911 e Alemanha desde 1901, no intuito de estabelecer limites para a máxima diferença de potencial entre pontos do sistema de ferroviário e entre o trilho e estruturas vizinhas enterradas. Em 1916, nos Estados Unidos, a *Corrosion Society* distribuiu recomendações sobre métodos de mitigação.

Entre 1890 e 1950 numerosos estudos foram conduzidos por comitês e comunidades de engenheiros, para identificar os problemas e propor formas de mitigação. Muitas das proposições de mitigação foram implementadas em novos projetos, obtendo resultados diversos, alguns adversos a linhas de utilidades próximas, sendo necessário conduzir estudos ainda mais aprofundados (MEMON; FOMME, 2014).

Nos anos entre 1960 e 1999, o avanço tecnológico propiciou estudos mais profundos em relação aos princípios de projeto e construção. Levantamentos de referência começaram a ser realizados levando-se em consideração as características do solo, o posicionamento das tubulações de utilidades e outros testes relevantes. Os dados auxiliariam a projetista do sistema a elaborar um projeto com parâmetros mitigativos e procedimentos de manutenção (MEMON; FOMME, 2014).

Os autores complementam que neste período surgiram 3 (três) esquemas de aterramento distintos, o (i) solidamente aterrado, que consiste no aterramento do trilho de retorno na subestação retificadora, (ii) flutuante, que se baseia na isolação do trilho de retorno em relação ao terra em todo seu percurso e o (iii) sistema de diodo, que consiste na conexão de um diodo entre o terra e o trilho de retorno.

Estudos demonstraram que o sistema de aterramento com o trilho de retorno flutuante seria o mais adequado, mantendo o potencial do trilho sob controle (COTTON; CHARALAMBOUS; AYLOTT; ERNST, 2005).

Ainda neste período, as mesmas recomendações elaboradas anteriormente continuaram a ser empregadas, porém com o aprimoramento e padronização dos componentes do sistema (MEMON; FOMME, 2014).

2.2. TRILHOS COMO CIRCUITO DE RETORNO

Os trilhos de rolamento são em sua grande maioria empregados como circuitos de retorno, além de sua função original como ponto de aderência da roda do material rodante. Usualmente feitos de aço, a sua propriedade elétrica é ruim, pois possui baixa condutividade elétrica. Esse lado negativo é compensado por sua grande área transversal e resistência mecânica (PIRES, 2013).

Normalmente, são instalados sobre dormentes (madeira ou concreto) e também sobre a laje do túnel. Nesses tipos de instalações, o trilho de rolamento não fica totalmente isolado, ou seja, para a corrente de retorno o trilho não é o único caminho. Parte da corrente é dividida e passa pelo solo e por estruturas metálicas e tubulações próximas da via corrida. Próximo às subestações, a corrente volta para o trilho que por sua vez retorna a subestação retificadora. Conforme mencionado, a essa parcela da corrente que se divide em meios não previstos para o retorno da corrente, denomina-se corrente de fuga (PIRES, 2013).

Um ponto importante e determinante para viabilizar a corrente de retorno pelo trilho refere-se ao sistema de sinalização, que pode utilizá-lo para tráfego de dados. Na linha 4 Amarela do sistema metroviário de São Paulo, utiliza-se o sistema de sinalização por

CBTC, em que um dos trilhos é utilizado para definição da ocupação do tramo de via e o outro é disponibilizado como retorno da tração. (PIRES, 2013).

Os trilhos são usualmente confeccionados de 12 a 24 metros. Atualmente, com o emprego das soldas na junção entre trilhos, os mesmos podem ser considerados contínuos. Em algumas linhas encontram-se também talas de junção para união dos trilhos, porém esta solução não garante a condutividade elétrica e por isso são instalados cabos para interligação dos trilhos. Essa interligação entre trilhos da mesma via também é chamado de “*Rail Bond*” (PIRES, 2013).

2.3. TENSÃO DE TOQUE

A IEC 62128-1 (2013) define a tensão de toque efetiva, como a tensão entre partes condutivas quando tocadas por pessoas ou animais, quando não tocadas, denomina-se tensão de toque prospectiva. A norma destaca ainda que o valor da tensão de toque é influenciado pela impedância do corpo da pessoa ou animal no contato elétrico entre estas partes condutivas.

As tensões de toque permissíveis, em sistemas de tração em corrente contínua, são apresentadas no item 9.3 da norma IEC 62128-1. A tensão de toque permissível está em função do tempo de duração da tensão, e do ambiente de exposição. Para tempos de duração menor que 0,7 s, a norma utiliza o termo “curta duração” e para tempos a partir de 0,7s, “longa duração”. A análise da tabela 5 da IEC 62128-1 permite observar que para um tempo de exposição permanente (>300 s) o valor da máxima tensão permitida é de 120 Vcc. Para pátios de manutenção, a norma estabelece em seu capítulo 9.3.2.3 o valor da tensão de toque não deve exceder 60 V.

A abordagem da tensão de toque é fundamental no contexto desta monografia, tendo em vista que o controle de correntes de fuga e a minimização da tensão de toque são requisitos básicos e contraditórios. Prevenindo a fuga da corrente de retorno do sistemas de tração, por outros meios diferentes do trilho, aumenta-se a tensão nos trilhos trazendo riscos de tensão de toque à pessoas (PIRES, 2013 apud RÖHLIG, 2001).

2.4. CORRENTE DE FUGA E CORROSÃO ELETROLÍTICA

A norma IEC 62128-1 (2013) item 3.6.3 define corrente de fuga como a corrente elétrica proveniente do circuito de tração elétrica que utiliza como retorno, outros caminhos, distintos do circuito de retorno.

A mesma norma aponta ainda que a intensidade da corrente depende da concepção adotada para o sistema de tração elétrica, sendo os principais parâmetros: a condutância por unidade de comprimento entre a via e as demais partes que compõem o sistema de retorno da retificadora; a distância entre subestações retificadoras; a resistência longitudinal do trilho de rolamento; o espaçamento entre os *cross-bonds*. A taxa de corrosão no trilho é o principal aspecto na análise de risco.

Quando se fala em corrente de fuga em sistema de metroviários correlacionamos com a corrosão eletrolítica de tubulações e estruturas próximas as linhas de metro. Basicamente isso se dá pelo fato de a resistência de isolação entre o trilho e o solo não ser infinita e elevada. Normalmente os valores da Isolação entre o trilho de rolamento e o terra estrutural são baixos devido sua proximidade trilho- solo (PEREIRA FILHO, 2014; PIRES, 2013).

O caminho normal da corrente do circuito de tração inicia da Subestação Retificadora passando pela linha de contato, chegando até a carga, retornando pelos trilhos de rolamento até retornar a fonte (PIRES, 2006).

Normalmente o lado positivo não apresenta problemas, pois está muito bem isolado do terra estrutural. A ligação da saída positiva da retificadora até a linha de contato é realizada com cabos protegidos e sua capa de proteção e isolação resistente (PEREIRA FILHO, 2014; PIRES, 2013; PIRES, 2014a).

A ligação do retorno negativo da via até a subestação retificadora é feita também por cabos com características mecânicas resistentes. Deste modo, o problema está no trecho da carga até o ponto de conexão do trilho, ou seja, todo o percurso do trilho de rolamento em que o trem percorre. É nesse trecho, devido à baixa isolação, que a

corrente de retorno se divide podendo passar por estruturas e tubulações não desejadas (PIRES, 2013).

O grande problema da corrente de fuga está na corrosão eletrolítica devido à perda de material e oxidação das tubulações e estruturas metálicas próximas à via corrida. Os trilhos sobre os dormentes ou lajes de concreto e as canalizações/estruturas metálicas enterradas simulam uma meio comum da eletrolise: a célula eletroquímica. Os trilhos e as tubulações sobre a terra se comparam a dois elementos metálicos emersos em eletrólito. Isso é devido ao solo apresentar elementos químicos que favorecem esse ambiente eletrolítico como: sais, ácidos e bases (PIRES, 2013; Pires, 2006).

Durante a corrosão dois processos químicos ocorrem de forma separada: A semirreação do ânodo e a semirreação do cátodo. Em específico, a semirreação do cátodo pode alterar dependendo do pH do solo (eletrólito). Abaixo segue as reações químicas que ocorrem com o ferro para exemplificar (PIRES, 2013; Pires, 2006):

- $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (Semirreação no ânodo (oxidação)) ;
- $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$ (Semirreação no Cátodo (redução) para pH < 7);
- $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ (Semirreação no Cátodo (redução) para pH > 7);

Para ocorrer o processo da eletrólise (corrosão eletrolítica) é necessária uma corrente de excitação causada por uma fonte externa. Nesse caso a corrente de fuga faz o papel de corrente de excitação passando pelos eletrodos (trilho de rolamento e tubulações) no meio eletrolítico (solo) (PIRES, 2013; Pires, 2006).

Toda vez que a corrente elétrica, adotando um sentido, entra no cátodo e sai pelo ânodo o fluxo de elétrons entra pelo ânodo e sai pelo cátodo, ou seja, o sentido dos elétrons é contrário ao sentido da corrente (PIRES, 2013; Pires, 2006).

Com o fluxo de elétrons há uma migração de íons do cátodo para o ânodo e com ele é levado material junto e com isso há perda de metal no ânodo causando oxidação e depósito de material no cátodo. O metal perdido é distribuído no solo e sua massa pode ser calculada pela 1^a lei de Faraday (PIRES, 2013; Pires, 2006).

A IEC 62128-2 (2013) aponta que há perdas toleráveis nas vias por um período de 25 anos, se a média de corrente de fuga por unidade de comprimento não atingir o valor de 2,5 mA/m para uma única via, e 5,0 mA/m para duas vias. Sendo que para mais de duas vias, o valor deve ser incrementado respeitando esta correlação. O valor máximo de condutância e o valor médio do potencial do trilho não devem ultrapassar as seguintes condições:

$$G_{tvte} \leq 0,5 \frac{\text{S}}{\text{km}} \text{ por via e } U_{tvte} \leq +5 \text{ V para formação aberta} \quad (1)$$

Para os sistemas compostos por estruturas com reforço metálico, como viadutos, túneis e estrutura de via, a norma aponta que a diferença de potencial entre as partes metálicas da estrutura e o terra estrutural deve ser considerada, de modo a preservar as integridades destas estruturas. Deste modo, a IEC 62128-2 (2013) estabelece que o máximo valor permitido, no período de tráfego mais elevado dever ser de +200 mV. No caso de estruturas metálicas enterradas, o valor depende da resistividade do solo e do material em questão, a norma EN-50162 (2004) fornece os valores apropriados.

2.5. VIA PERMANENTE

A definição de Via Permanente metroviária, conceitualmente, é o meio físico e estrutura necessária para suportar e transmitir o material rodante de forma confiável e segura através da correta aderência roda-trilho (STEFFLER, 2013).

As principais funções da via permanente são a orientação do material rodante de forma estável e segura, além de transmitir as cargas, devido a passagem dos trens, para as fundações e solos (KLINCEVICIUS, 2011).

Pode-se dividir a Via Permanente em dois subgrupos, sendo eles a infraestrutura e a superestrutura. A infraestrutura é composta por obras civis de terraplanagem e de arte (túneis, pontes e viadutos). Responsável por dar suporte à superestrutura e garantir as condições de contorno como drenagem e transposição de relevo acidentado (STEFFLER, 2013). A superestrutura é responsável pelo contato roda-trem, de captar e

transmitir as cargas de maneira uniforme através de sua composição e conjunto de fixações estruturais. Ela é instalada sobre a infraestrutura (STEFFLER, 2013).

No Brasil a definição acima é valida, mas em outros, como Estados unidos e Inglaterra os elementos de fixação fazem parte da infraestrutura (KLINCEVICIUS, 2011).

2.6. TRILHOS

Os trilhos são responsáveis pelos apoios do material rodante através do contato rodatriollo. Possuem uma função estrutural (transmissão e distribuição de cargas) além de orientar o caminho do trem. Eletricamente, tem a função de transmitir a corrente de retorno do sistema de tração das subestações retificadoras e em linhas mais modernas é usada pelo sistema de sinalização para referenciar a posição do trem (STEFFLER, 2013).

Segundo Sartori (2010) em sistemas metroviários o tipo mais usado é o Vignole e é composto por três partes: (i) Boleto: Recebe a carga das rodas e possui área adequada reduzir a pressão e permitir o desgaste; (ii) Alma: Responsável pela interligação do boleto e o patim. Sua altura define a inércia e grande parte da resistência do perfil a carga máxima por eixo; (iii) Patim: Responsável por transferir a carga aos dormentes. Sua base tem a forma achatada para minimizar a pressão de contato e facilitar os elementos de fixação. A Figura 2 apresenta respectivamente perspectiva do trilho Vignole.

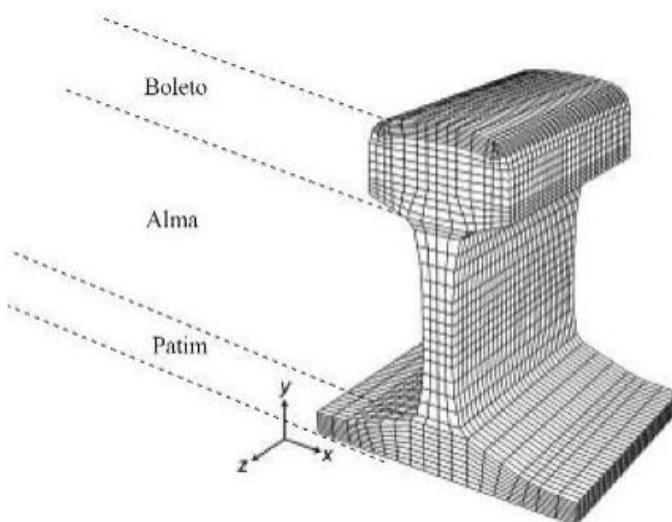


Figura 2 - Perfil Vignole. Fonte: Sartori (2010)

Além o tipo Vignole, existe o trilho tipo fenda usado principalmente em VLT (Veículos Leves sobre Trilhos) devido ao convívio do material rodante, veículos e pedestres (SARTORI, 2010; PEREIRA FILHO, 2014).

Basicamente os trilhos são divididos conforme sua capacidade de carga kg/m (quilos de trilho por metro linear). De modo geral existem dois padrões mais utilizados: AREA (*American Railway Engineering Association*) e UIC (*Union Internationales des Chemins de Fer* – União Internacional de Ferrovias) (STEFFLER, 2013).

- I. Principais tipos UIC: S41 – 41 kg/m; S49 – 49 kg/m; S54 – 54 kg/m; UIC60 – 60 kg/m; Ri59 – 59 kg/m;
- II. Principais tipos AREA: TR-37 – 37 kg/m; TR-45 – 45 kg/m; TR-50 – 50 kg/m; TR-57 – 57 kg/m;

O principal componente do trilho é o ferro com 98% da composição sendo os outros 2% dos componentes formados por Carbono, Manganês, Silício, Fósforo e Enxofre que combinados entre si garantem a dureza e elasticidade (STEFFLER, 2013).

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para formar o produto proposto a esta monografia, divide-se em 2 (duas) etapas, a serem realizadas em linhas do sistema metroviário da cidade de São Paulo:

- I. Levantamentos em campo para registro e constatação dos efeitos da corrente de fuga em elementos na região da via permanente;
- II. Estabelecer recomendações de projeto que previnam níveis elevados de corrente de fuga na linha em conformidade com as normativas vigentes internacionais;

A etapa I tem o objetivo de constatar os problemas ocasionados pela presença de corrente de fuga ao longo do tempo em elementos e estruturas condutivas próximas à região da via permanente. Após os registros serão realizadas análises dos problemas encontrados. Foram realizadas visitas à linhas metroviárias para coleta de dados.

Na etapa II foram sintetizadas recomendações de projeto para via permanente, de modo a evitar ou minimizar os danos e níveis de corrente de fuga relatados na etapa I, em conformidade com as normas internacionais vigentes que tratam a questão da corrente de fuga e corrosão eletrolítica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ABORDAGEM GERAL

A IEC 62128-2 (2013) estabelece que um estudo faz-se necessário na concepção do projeto. Em sistemas já implantados, o estudo do impacto da corrente de fuga é fundamental na prevenção de valores de corrente de fuga incompatíveis com o estabelecido na IEC 62128-2 (2013). Normalmente, em sistemas antigos, há a tendência do aumento do valor da corrente de fuga.

A isolação entre o trilho de rolamento e o terra estrutural, representa um parâmetro essencial para a manutenção da baixa corrente de fuga no sistema. Sendo assim, o projeto deve ser desenvolvido de modo que os componentes responsáveis por esta isolação não percam seu desempenho quando submetidos à alta humidade, destaca a IEC 62128-2. A drenagem da via apresenta-se como outro parâmetro fundamental a ser considerado no projeto, uma vez que há grande dificuldade em executar um eficaz controle e minimização de corrente de fuga em vias excessivamente húmidas e empoçadas, o que contribuirá para a diminuição da isolação dos trilhos em relação à terra (PIRES, 2014b).

No capítulo 4.2 serão relatados e discutidos os casos encontrados através do levantamento em campo realizado em linhas dos sistemas metroviários de São Paulo.

As recomendações de projeto para os principais parâmetros de via permanente estão sintetizados no capítulo 4.3.

4.2. REGISTROS DOS EFEITOS DA CORRENTE DE FUGA

Conforme visto no capítulo 2.5, o principal efeito da corrente de fuga prejudicial ao sistema metroviário, tubulações e estruturas ao seu redor é a corrosão eletrolítica, que pela perda de material na região anódica pode causar sérios riscos a operação dos sistemas envolvidos (PEREIRA FILHO, 2014; PIRES, 2014a).

A seguir serão apresentados casos observados em linhas metroviárias da cidade de São Paulo com problemas que tiveram como origem a corrente de fuga.

Para os trechos da via permanente em curva os esforços sobre os trilhos de rolamentos são maiores devido às ações mecânicas da torção, dilatação térmica e passagem de corrente.

Na Figura 3, que apresenta um trilho localizado em região de curva, uma perda de material pode ocasionar trinca no trilho devido aos esforços estáticos de sua própria natureza e dinâmicos devido à passagem dos trens, podendo ocasionar trincas, e consequentemente a sua ruptura.

Nessas regiões de curva os trilhos com os patins danificados são substituídos com máxima prioridade devido ao risco ao qual o sistema está exposto.



Figura 3 – Trinca Trilho. Fonte: O próprio autor, 2016.

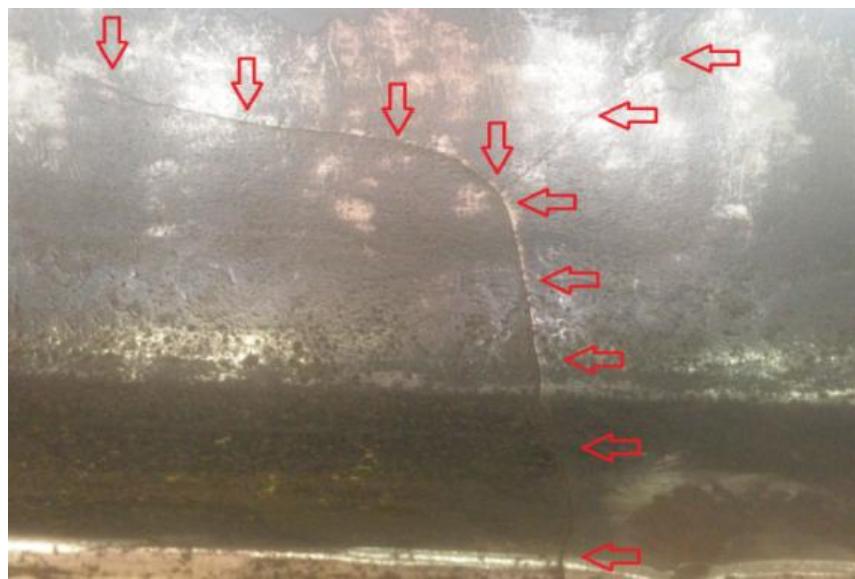


Figura 4 – Trinca no trilho devido a corrente de fuga. Fonte: O próprio autor, 2016.

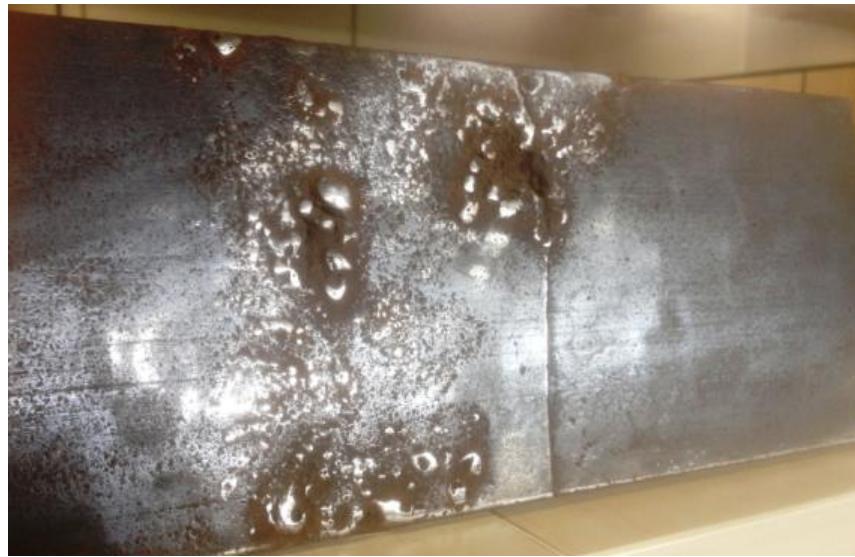


Figura 5 – Base do trilho - Corrosão Eletrolítica e Fusão. Fonte: O próprio autor, 2016.

O caso 1B apresentado na Figura 6, podemos observar outro problema semelhante ao caso 1A, também na região de curva. Neste caso há a perda de material na base do trilho e a fundição do patim provavelmente ocasionou a trinca. Nas Setas pode-se observar a trinca e as regiões circuladas mostram o sobreaquecimento do fastclip e uma perda de material na base onde há o contato com o tirefond. O Tifond ao lado mostra o ponto por onde parte da corrente de tração foi drenada para a estrutura da via permanente.



Figura 6 – Trinca do Trilho e Sinais de Corrente de Fuga. Fonte: O próprio autor, 2016.

Outra situação, visualizada através das bolhas na parte inferior do trilho da Figura 5 é a ocorrência de fugas de correntes elevadas que por efeito joule levam os materiais à altas temperaturas, superiores ao ponto de fusão do material. Tal fenômeno ocasiona a fundição das peças, e causa a projeção de componentes metálicos com elevadas temperaturas para a região da alma do trilho.

4.3. RECOMENDAÇÕES DE PROJETO

4.3.1. Trilho de rolamento

A resistência dos trilhos de rolamento deve ser baixa, de modo a propiciar um caminho preferencial de baixa resistência para a corrente de retorno (IEC 62128-2, 2013; MENON; FROMME, 2014; GIURIATI; FREIRE, 1985).

A tabela 1 apresenta a resistência por unidade de comprimento de alguns trilhos de rolagem do mercado (PIRES, 2006 apud KIEBLING; PUSCHMANN; SCHMIEDER, 2001).

Tabela 1 – Resistência por unidade de comprimento de alguns trilhos de rolagem

Tipo de trilho	Desgaste [%]	Trilho (mΩ/km)	Via singela (mΩ/km)	Via Dupla (mΩ/km)
S49	0	35,7	17,8	8,9
	15	42,0	21,0	10,5
UIC 54	0	32,0	16,0	8,0
	15	37,6	18,8	9,4
UIC 60	0	28,9	15,0	7,5
	15	34,0	17,0	8,5
R60	0	28,8	14,9	7,5
	15	33,0	17,0	8,5
R65	0	25,2	12,7	6,4
	15	29,9	14,9	7,5

O Metrô de São Paulo recomenda para suas linhas mais recentes a minimização da resistência elétrica longitudinal dos quatro trilhos de rolamento (condutores de retorno das correntes de tração) através da utilização dos trilhos em paralelo do tipo UIC 60. Além do valor da resistência elétrica para os quatro trilhos conectados em paralelo, com valores aproximadamente iguais a 9,44 mΩ/km e a queda de tensão máxima nos trilhos de rolamento deverá ser limitada a 90 Vcc (PIRES, 2014b; CMSP, 2006).

Ainda, vale dizer que os trilhos de rolamento normalmente não levam em consideração a questão da corrente de fuga para definição da tipologia do mesmo, mas o tipo de transporte, as características dimensionais, a carga máxima e sua frequência de utilização, entre outros aspectos (PEREIRA FILHO, 2015).

A IEC 62128-2 (2013) salienta a preocupação com as juntas de bondeamento entre trilhos. Segundo a norma, com a colocação das juntas não deve representar um aumento de 5% na resistência longitudinal dos trilhos, e caso isso ocorra, a norma recomenda a utilização de trilhos com maior seção e a a utilização de ligações *track-to-track-cross bond*, que será detalhada no capítulo 4.3.2.

O processo de construção da via, atualmente, utiliza as peças dos trilhos soldadas continuamente, com a presença de juntas de isolamento quando necessário. Esta

metodologia favorece a continuidade do trilho de rolamento para o retorno da corrente de tração (PEREIRA FILHO, 2015; MENON, S. A.; FROMME, P., 2014).

A distância entre as subestações influencia na resistência longitudinal do trilho de retorno, uma vez que o aumento da dimensão longitudinal gera um aumento da resistência equivalente do trilho. Também gera o aumento da elevação de tensão no trilho (MENON, S. A.; FROMME, P., 2014).

As medidas que diminuem a resistência longitudinal no trilho também influem positivamente para manter uma elevação de potencial no trilho de rolamento (IEC 62128-2, 2013; MENON, S. A.; FROMME, P., 2014).

Podem-se resumir as recomendações para projeto, no que se refere ao trilho de rolamento e parâmetros relacionados, da seguinte maneira:

- Baixa resistência longitudinal da ordem de 40 mΩ/km, a ser avaliado junto ao nível de tensão adotado para a linha (IEC 62128-2, 2013, VDV 501/1, 1993; COTTON, I.; CHARALAMBOUS, C.; AYLLOT, P.; ERNST, P., 2005);
- Possuir sua continuidade elétrica garantida através da soldagem entre as diferentes partes dos trilhos na construção da via (PEREIRA FILHO, 2015; MENON, S. A.; FROMME, P., 2014);
- Onde houver a necessidade de juntas de bondeamento no trilho, estas deverão possuir baixa resistência, ou seja, uma condutância maior ou igual a do trilho de rolamento e sua conexão deve ser realizada preferencialmente através de solda (IEC 62128, 2013; PEREIRA FILHO, 2015; MENON, S. A.; FROMME, P., 2014).
- A distância entre as subestações ser reduzidas (IEC 62128-2, 2013; Pires, 2013), da ordem de 1,6 a 3,2 km, de acordo com o nível de tensão adotado para a linha (MENON, S. A.; FROMME, P., 2014).

4.3.2. Ligação entre trilhos (track-to-track-cross bond)

A conexão entre os trilhos de retorno ao longo da linha promove a distribuição uniforme da corrente de retorno entre os trilhos e redução da queda de tensão neles (PIRES, 2013). Segundo a IEC 62128-2 item 6.2.7, os elementos que promovem esta conexão

devem ser isolados. A IEC 62128-1 e 2, com o propósito de manter as quedas de tensão e as perdas de potência menores possíveis, além da conexão entre os trilhos de uma mesma via, pode-se realizar a conexão entre trilhos de uma via com os trilhos de outra via de uma mesma linha.

No sistema metroviário da cidade de São Paulo, usualmente realiza-se a interligação dos 4 (trilhos) de uma linha em via dupla a cada 250 m através de, no mínimo, 2 (dois) cabos de 240 mm² (seção mínima). Utiliza-se em algumas linhas a conexão de somente 2 trilhos de uma linha em via dupla, também a cada 250 m, através de no mínimo 2 cabos de 240 mm² (seção mínima). Neste último caso, a conexão não ocorre em todos os trilhos, por questões de compatibilidade com o circuito de vias do sistema de sinalização (PIRES, 2014).

Nos Estados Unidos os cross bonds são instalados usualmente a uma distância de 152 m em sistemas urbanos de superfície e entre 305 e 610 m em sistemas enterrados. Na Alemanha a cada 100 m utiliza-se a conexão paralela entre os trilhos. Na França entre 50 e 100 m, e na Inglaterra a cada 36.6 m (MENON, S. A.; FROMME, P., 2014 apud ARNOLD, 1921).

A Figura 7 ilustra um ponto de conexão cross bond entre trilhos de uma via e entre vias (CMSP, 2013).

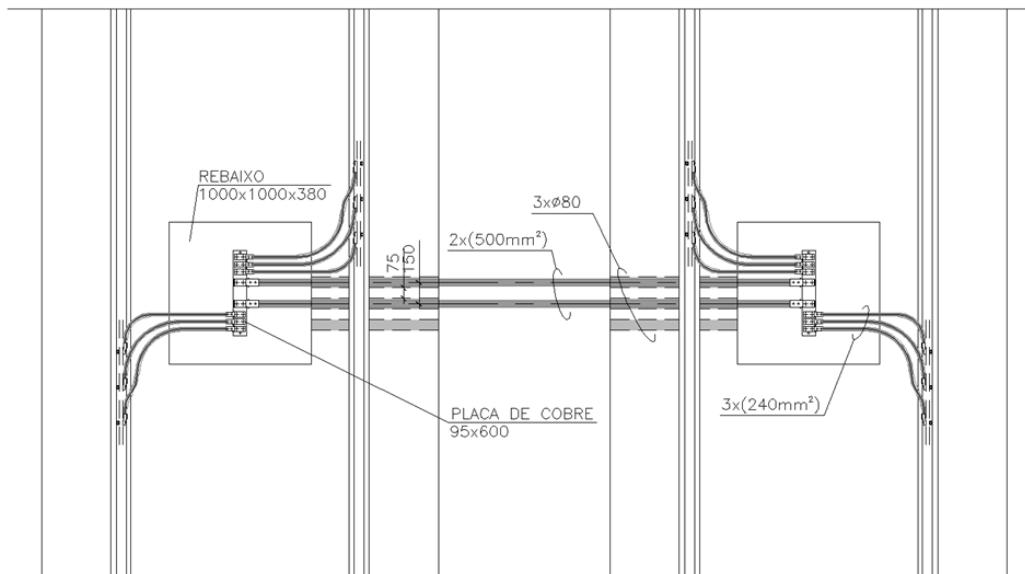


Figura 7 – Cabos de retorno e cross bond. Fonte: Fonte: CMSP (2013).

Normalmente as conexões de cross-bond são determinadas na simulação de potência de eletrificação das linhas com o gráfico da elevação de potencial ao longo da via. Nos pontos onde há a elevação de potencial, há a conexão dos cabos entre os trilhos de uma mesma via e entre vias. Porém, do ponto de vista de corrente de fuga, a conexão frequente do cabo cross bond garante o paralelismo entre vias do circuito de retorno, e portanto, uma queda da resistência longitudinal do conjunto. Deve-se também levar em consideração que as simulações de eletrificação dos sistemas de tração não levam em consideração situações de falhas na condução da corrente no trilho de retorno, como por exemplo a falha da continuidade do trilho e aumento excessivo de resistência longitudinal (PEREIRA FILHO, 2014).

No que se refere ao cross bond e parâmetros relacionados, as recomendações de projeto podem ser colocadas da seguinte maneira:

- Em linhas metroviárias com tração em corrente contínua recomenda-se a aplicação das ligações track-to-track-cross bond, em toda a extensão da linha, entre os trilhos de uma mesma via e entre as vias (PEREIRA FILHO, 2014);
- A quantidade específica de conexões deve ser determinada em cada projeto. Quanto maior a quantidade de conexões, maior será a garantia do paralelismo entre as vias, portanto maior a eficiência na minimização de correntes de fuga (PEREIRA FILHO, 2014);
- A resistência da conexão depende da corrente de tração envolvida no projeto. Quanto menor a impedância entre as conexões da via, mais eficiente será o paralelismo entre vias. O valor da resistência de conexão deve ser menor que o valor da resistência do trilho. Portanto, da ordem de 40 mΩ/km, a ser avaliado junto ao nível de tensão adotado para a linha (IEC 62128-2, 2013, VDV 501/1, 1993; COTTON, I.; CHARALAMBOUS, C.; AYLLOT, P.; ERNST, P., 2005).

4.3.3. 4º (quarto) trilho

Um condutor isolado da terra, que recebe o nome de 4º (quarto) trilho pode ser utilizado como condutor de retorno. Quando este condutor compõe um circuito de tração

totalmente isolado dos trilhos de rolamento, normalmente não há ocorrência de corrente de fuga. Nos sistemas em que há 3º (positivo) e 4º (negativo) trilhos de alimentação, estes devem ser isolados adequadamente, em conformidade com a IEC 60850 (IEC 62128-2, 2013).

Na linha 1 do Metrô de Milão e em Londres, o circuito de retorno é realizado através de um 4º trilho isolado, montado no centro da via (DUFFY, 2003; PERTICAROLI, 2001).

A utilização do 4º trilho de retorno representa um ganho significativo em relação a três questões principais e por essas razões este sistema foi desenvolvido e implementado (IEC 62128-2, 2013; DUFFY, 2003; HILL, 1994; BARLO; ZDUNEK, 1995; ELIOT, 2012):

- Normalmente elimina o processo de corrente de fuga e corrosão eletrolítica na linha de Metrô;
- Torna desprezível a elevação de potencial na linha, estabelecendo uma condição segura de potencial de toque ao usuário, preconizado atualmente na IEC62128-1;
- Segregação do circuito do retorno do sistema de tração elétrico e do circuito de sinalização de via.

A Figura 8, Figura 9 e Figura 10 ilustram a montagem do sistema de 4º trilho inglês.

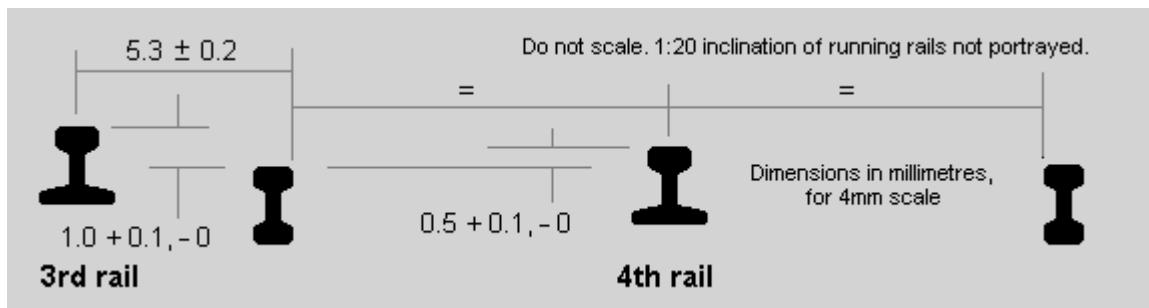


Figura 8 – Distribuição típica do 3º, 4º trilho e trilhos de rolamento. Configuração para Liverpool Overhead e Manchester-Bury. Fonte: Eliot (2012).

O sistema de retorno da corrente de tração por 4º trilho deve ser considerado na fase embrionária do projeto do sistema metroviário, uma vez que sua adoção traz impactos para o material rodante e obra civil da via permanente, que deve considerar seu gabarito no processo construtivo.

Em sistemas existentes, a implantação de um 4º trilho de retorno impacta em diversas modificações na via e material rodante, o que torna sua implantação de difícil viabilidade.



Figura 9 - Foto ilustrativa do 3º e 4º trilhos, e trilhos de rolamento na Estação White City em Londres.

Fonte: Eliot (2012)

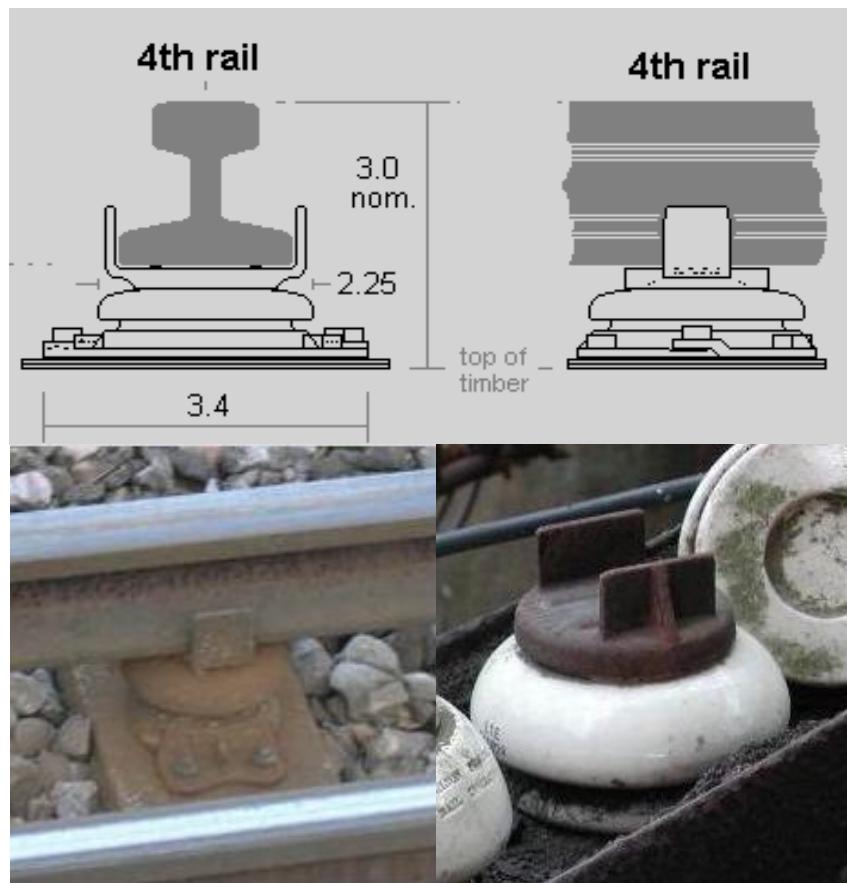


Figura 10 – Esquema de montagem do 4º trilho com o isolador (superior). Foto do conjunto montado na via (esquerda inferior). Foto do isolador de porcelana (direita inferior). Fonte: Eliot (2012)

Porém, um sistema de retorno por 4º trilho pode não ser adotado pelo seu elevado custo de implantação (BARLO; ZDUNEK, 1995).

Com base na proposição desta monografia, que visa as recomendações de projeto de via permanente para minimização de corrente de fuga e corrosão eletrolítica em sistemas metroviários com tração elétrica em corrente contínua, pode-se estabelecer o seguinte comentário à projetos em relação à adoção de um sistema com 4º (quarto) trilho:

- A adoção do sistema de retorno completamente isolado, denominado 4º trilho é preferencial para a minimização, ou até eliminação de correntes de fuga significativa no sistema metroviário estudado na presente monografia. Sua adoção deve ser considerada desde a fase embrionária de implantação do sistema metroviário.

4.3.4. Sistema de tração em pátios de manutenção

Apesar do aumento da segurança, referente à tensão de toque na região do pátio de manutenção, a medida de conectar o trilho de retorno ao sistema de terra pode influenciar no aumento de corrente de fuga pelo sistema. Isto ocorre devido a queda da impedância do circuito entre o trilho de rolamento na via, isolamento do trilho, solo e elementos condutivos imersos no mesmo e a impedância de retorno da corrente de fuga, proveniente dos elementos condutivos imersos ao solo e o negativo da subestação retificadora.

O projeto deve possuir meios facilitadores da chegada da corrente de retorno à retificadora. Portanto, recomenda-se que o trilho de retorno seja aterrado somente na subestação retificadora, de modo que o trilho de retorno permaneça, em toda sua extensão, intencionalmente isolado do solo, através das mediadas preventivas presentes na IEC 62128-2.

Recomenda-se também a implantação de um sistema de alimentação negativo, conectando a barra de aterramento da subestação retificadora a todos os trilhos de rolamento do pátio, preferencialmente uniformemente espaçados ao longo de todo o encaminhamento dos trilhos dentro da região do pátio, através de condutores isolados, que terão um papel semelhante ao 4º trilho citado no capítulo 4.4.7, e em conformidade ao citado na IEC 62128-2 item 6.2.6. A norma estabelece que exceções sejam admitidas, mediante um estudo de correntes de fuga, o qual prove que efeitos negativos não poderão ocorrer no sistema e neste caso, a tensão de toque proveniente da elevação de potencial no pátio deve atender a IEC 62128-1. No caso de conexão entre o pátio e a linha principal, a isolação do trilho de retorno no pátio deve ser a mesma requerida para a linha principal. Também deverão ser tomadas todas as medidas para prevenção de tensão de toque e a inclusão de um limitador de tensão na região deve ser considerada, em conformidade com a IEC 62128-1 item 9.3.2.3.

Portanto, para pátios de manutenção, do ponto de vista de parâmetros de projetos, e visando uma maior segurança aos sistemas e colaboradores das operadoras do sistema metroviário, estabelecem-se as seguintes recomendações:

- A segregação de alimentação de tração entre o pátio e a via principal (IEC 62128-2, 2013);
- A utilização de cabos isolados alimentadores de negativo, em toda a extensão do pátio, interligados à barra de aterramento da subestação retificadora, de modo a criar um caminho preferencial de baixa impedância para a corrente de retorno, diferente do solo (CMSP, 2015);
- Como especificado no capítulo 4.4.1, a condutância por unidade de comprimento entre os trilhos de rolamento e o terra não ser inferior a 1 S/km (VDV 501/1, 1993);
- Como consequência da segregação entre via e pátio, recomenda-se que o sistema de tração possua redundância no sistema de tração, ou seja, alimentado por pelo menos duas retificadoras (PIRES, 2014a).
- As entradas e saída do pátio, onde se encontra o tramo neutro, gerados a partir das juntas de isolação do trilho não deverão possuir rampas, uma vez que ao tracionar a entrada ou saída do tramo neutro, um arco é produzido entre o trilho e o material rodante, causando um desgaste excessivo no topo do boleto.

5. CONCLUSÃO

A presente monografia permitiu uma análise atual dos efeitos da corrente de fuga e corrosão eletrolítica nas vias das linhas de sistemas metroviários. Tal análise reforça a necessidade de um projeto elaborado com as premissas e medidas normativas vigentes, de modo a minimizar ou evitar problemas ocasionados por este fenômeno.

O trabalho e as recomendações de projeto tiveram como foco a região da via permanente. Foram abordados os temas referentes ao trilho de rolamento, ligação entre os trilhos (*track-to-track-cross bond*) e a adoção de um sistema de retorno da retificadora de tração por 4º trilho.

Entre as principais recomendações elaboradas pode-se citar:

- Os trilhos de rolamento devem possuir baixa resistência longitudinal da ordem de 40 mΩ/km. A baixa resistência longitudinal do trilho de retorno é fundamental para proporcionar um caminho preferencial à corrente de retorno (IEC 62128-2, 2013, VDV 501/1, 1993; COTTON, I.; CHARALAMBOUS, C.; AYLLOT, P.; ERNST, P., 2005).
- Em linhas metroviárias com tração em corrente contínua recomenda-se a aplicação das ligações *track-to-track-cross bond*, em toda a extensão da linha, entre os trilhos de uma mesma via e entre as vias (PEREIRA FILHO, 2014);
- A adoção do sistema de retorno completamente isolado, denominado 4º trilho é preferencial para a minimização, ou até eliminação de correntes de fuga significativa no sistema metroviário estudado na presente monografia. A elevação de potencial na linha torna-se desprezível, estabelecendo uma condição segura de potencial de toque ao usuário, preconizado atualmente na IEC62128-1. Além disso, há a segregação do circuito do retorno e do circuito de sinalização de via. Caso definida, a adoção do 4º trilho deve ser considerada desde a fase embrionária de implantação do sistema metroviário (IEC 62128-2, 2013; DUFFY, 2003; HILL, 1994; BARLO; ZDUNEK, 1995; ELIOT, 2012).

- Para pátios de manutenção, do ponto de vista de parâmetros de projetos, e visando uma maior segurança aos sistemas e colaboradores das operadoras do sistema metroviário, entende-se que estes devem ser segregados da via principal, e ter o negativo da retificadora aterrado. Em conjunto com esta medida, devem ser adotados meios facilitadores da chegada da corrente de retorno à retificadora. Portanto, o trilho de retorno seria aterrado somente na subestação retificadora, de modo que permaneça isolado em toda sua extensão (IEC 62128-2, 2013; CMS, 2015; PIRES, 2014a).

O trabalho permitiu observar que dentre todos os parâmetros envolvidos em um sistema de minimização de corrente de fuga, a isolação entre o trilho de rolamento e o terra é o parâmetro prioritário de todo o sistema de minimização de corrente de fuga, uma vez que ao deixar o trilho, um ponto de corrosão é criado pela corrente de eletrólise, deteriorando a integridade física dos materiais existentes neste. Por este ponto de corrosão, a isolação do trilho de rolamento é comprometida, e grande quantidade de corrente passa a atravessar tal local. Neste caso, o efeito joule neste ponto passa a ser o protagonista da destruição do sistema, causando a fusão do trilho e elementos de fixação nesta região.

Sendo assim, a deterioração do sistema não ocorre de modo uniforme, mas pontual, nos pontos mais vulneráveis (baixa isolação elétrica) da via.

Observou-se também que há grande dificuldade em manter os parâmetros estabelecidos em projeto pelos executores da obra civil, o que aumenta a vulnerabilidade de sistemas de minimização de corrente de fuga. Por esta razão, sistemas de laje flutuante construídos de forma pré-moldada, minimizariam os erros de execução durante a obra, e garantiriam uma maior eficácia do sistema de minimização de corrente de fuga.

O sistema de 4º trilho isolado, implementado com sucesso em outros sistemas metroviários no mundo, em túneis e superfícies, se apresenta como uma opção técnica viável ao problema de corrente de fuga. Ainda que, seu alto custo de implantação possa se tornar uma componente de inviabilidade econômica.

Aos próximos trabalhos nesta área, cabe a avaliação da implantação de sistemas alternativos, com alta probabilidade de sucesso na minimização de correntes de fuga, como por exemplo, o sistema de 4º trilho, avaliando o custo de implantação em comparação ao custo de manutenção gasto para manter o sistema metroviário operacionalmente seguro.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, B. J. **Report of the American Committee on Electrolysis**. New York: American Committee on Electrolysis, 1921. 214 p. Disponível em: <http://archive.org/details/reportofamerican00amerrich>.

BAHRA, K. S.; CATLOW, R. B. **Controle of stray currents for d.c. traction systems**. In: Electric Railways in a United Europe Conference, n. 405, United Kingdom, 1995.

BARLO, J. T.; ZDUNEK, A. D.; **Stray Current Corrosion in Electrified Rail Systems – Final Report**. Illinois: Northwestern University, 1995. 47p. (Relatório Técnico, s/n).

BLONDEL, A.; DUBOIS, F. P. **La traction électrique sur voies ferrées**. Paris: Librairie Polytechnique Baudry et Cie., 1898. 2 v.

BRUNTON, L. J.; **Earth leakage problems and solutions on the Tyne and Wear Metro**. IEE Proceedings, v. 136, pt. b, n. 3, p. 22-31, May, 1989.

CMSP. Companhia do Metropolitano de São Paulo. São Paulo. **Imagens das obras da linha 5 Lilás**. Disponível em: http://www.flickr.com/photos/metrosp_oficial/albums/72157650203058318 Acesso em 29 fev. 2016.

CMSP. Companhia do Metropolitano de São Paulo. **Projeto Básico do Sistema de Alimentação Elétrica e Auxiliares: Condições Gerais de Fornecimento**. São Paulo: Companhia do Metropolitano de São Paulo, 2015. (Documento Interno, Concepção de Sistemas, CS-2.89.99.XX/400-701). Não Publicado.

CMSP. Companhia do Metropolitano de São Paulo. **Memorial Descritivo do Sistema de Aterramento e SPDA**. São Paulo: Companhia do Metropolitano de São Paulo, 2006. (Memorial Descritivo, CS-4.00.00.00/6Z2-007).

COTTON, I.; CHARALAMBOUS, C.; AYLOTT, P.; ERNST, P. **Stray current control in dc mass transit system.** IEEE Transactions on Vehicular Technology. v. 54, n. 2, p. 722-730, 2005.

DA SILVA, L. S. **Procedimento para inspeção de material: trilho.** Brasília: Departamento Nacional Infraestrutura de Transporte, 2015. (Procedimento Técnico, PIM-001-TRILHO).

DOMINGUES, W.; **Proteção Catódica por corrente impressa no sistema adutor metropolitano de São Paulo.** Revista DAE SABESP, São Paulo, a. 61, n. 126, p. 275-285, 2008.

DUFFY, M. C. **Electric Railways 1880-1990.** United Kingdom: IET – The Institution of Engineering and Technology, 2003. 448 p.

ELLIOTT, R. **3rd and 4th rail dimensions and settings.** New York, NTI - National Transcommunication Limited, 2012. Disponível em:
<http://homepage.ntlworld.com/russelliott/3rd-4th.html>

EUROPEAN STARDARD. **EN 50162:** Protection against corrosion by stray current from direct current systems. Brussels, 2004.

GIURIATI, M.; FREIRE, G. A. L. M. **Método para a Minimização das correntes de fuga e medições para controle.** São Paulo: Companhia do Metropolitano de São Paulo, 1985. (Relatório Técnico, 5.3.15).

HILL, R. J. **Eletric Railway Traction Part 3: Traction Power Supplies.** Power Engineering Journal, p. 275-286. London, 1994.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62128-1:** Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 1: Protective provisions against electric shock. 3 ed. Genève, 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62128-2:** Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems. Genève, 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60850:** Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems. Genève, 2014.

KIEBLING F.; PUSCHMANN, R.; SCHMIEDER, A. **Contact lines for electric railways: planning, design, implementation.** 1.ed. Munich: Publicis Kommunikations Agentur, 2001. 288 p.

KLINCEVIVIUS, M. G. Y. **Estudo de Propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários.** 2011. 171p. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MENON, S. A.; FROMME, P.; **Stray-Current Corrosion and Mitigation: A synopsis of the technical methods used in dc transit systems.** IEEE Electrification Magazine. New York, n.3, p. 22-31, September 2014.

PANDROL. **Pandrol Vanguard: Product information.** Addlestone, [2015]. 4 p. (ISSUE-4-2015).

PEREIRA FILHO, M. L. *Curso de Especialização em Tecnologia Metroferroviária: Análise de Interferências Eletromagnéticas em Sistemas Elétricos e Eletrônicos*. São Paulo, PECE - Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ago. 2014. Anotação de Aula.

PERTICAROLI, F. *Sistemi elettrici per i trasporti – Trazione Elettrica*. 2 ed. Milano: Casa Editrice Ambrosiana, 2001. 497 p.

PIRES, C. L. *Curso de Especialização em Tecnologia Metroferroviária: Simulação de Marcha e do Sistema Elétrico de Alimentação*. São Paulo, PECE - Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ago. 2014a. Anotação de Aula.

PIRES, C. L. *Desempenho da via permanente e minimização de correntes de fuga: providências construtivas*. São Paulo: Companhia do Metropolitano de São Paulo, 2014b. (Especificação Técnica, ET-9.81.99.XX/322.001).

PIRES, C. L. *Engenharia elétrica ferroviária e metroviária: Do trólebus ao trem de alta velocidade*. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 432 p.

PIRES, C. L. *Simulação do Sistema de Tração Elétrica Metro-ferroviária*. 2006. 424 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PULGAS, M. S. *Íons de metais pesados Ni, Cu e Cr em área impactada por resíduo de galvanoplastia na região metropolitana de São Paulo-SP*. 2007. 83 p. Tese (Mestrado) – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

RÖHLIG, S. *Streuströme bei DC-Bahnen und elektrotechnische Anforderungen na den Gleisbau*. Elektrische Bahnen, v. 99, n. 1/2, p.84-89, 2001.

SARTORI, M. **Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Soldas Aluminotérmicas em Trilhos Ferroviários.** 2010. Dissertação (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia – Departamento de Metalurgia, Rio Grande do Sul, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/30124>>.

STEFFLER, F. **Via Permanente Aplicada: Guia Teórico e Prático.** São Paulo: LTC, 2013. 314p.

TICIANELLI, E. A. GONZALEZ, E. R.; **Eletroquímica: Princípios e Aplicações.** São Paulo: EDUSP, 2005. 235p.

VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN. **VDV 501/1: Verringerung der Korrosionsgefahr durch Streuströme in Tunneln von Gleichstrombahnen – Maßnahmen und Berechnungs-grundlagen.** Köln, 1993.