

**RODRIGO MITSUO KISE**

**RECOMENDAÇÕES DE PROJETO DE VIA PERMANENTE PARA  
MINIMIZAÇÃO DE CORRENTE DE FUGA E CORROSÃO  
ELETROLÍTICA EM SISTEMAS METROVIÁRIOS COM TRAÇÃO  
ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA: SUPERESTRUTURA E  
CONDUTOR LONGITUDINAL AUXILIAR**

**SÃO PAULO  
2016**

**RODRIGO MITSUO KISE**

**RECOMENDAÇÕES DE PROJETO DE VIA PERMANENTE PARA  
MINIMIZAÇÃO DE CORRENTE DE FUGA E CORROSÃO  
ELETROLÍTICA EM SISTEMAS METROVIÁRIOS COM TRAÇÃO  
ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA: SUPERESTRUTURA E  
CONDUTOR LONGITUDINAL AUXILIAR**

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

**SÃO PAULO**

**2016**

**RODRIGO MITSUO KISE**

**RECOMENDAÇÕES DE PROJETO DE VIA PERMANENTE PARA  
MINIMIZAÇÃO DE CORRENTE DE FUGA E CORROSÃO  
ELETROLÍTICA EM SISTEMAS METROVIÁRIOS COM TRAÇÃO  
ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA: SUPERESTRUTURA E  
CONDUTOR LONGITUDINAL AUXILIAR**

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**

### **Catálogo-na-publicação**

Kise, Rodrigo Mitsuo

Recomendações de projeto de via permanente para minimização de corrente de fuga e corrosão eletrolítica em sistemas metroviários com tração elétrica em corrente contínua: superestrutura e condutor longitudinal auxiliar / R. M. Kise -- 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. Corrosão Eletrolítica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II. t.

## **RESUMO**

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.

Este trabalho objetiva a elaboração de recomendações de projeto de via permanente com foco em superestrutura e condutor longitudinal auxiliar 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 medições que auxiliam na identificação dos pontos de fuga (baixa isolamento) 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 e consideradas na fase de projeto da via permanente.

A metodologia utilizada para atingir o objetivo proposto, envolve: (i) a análise das normas existentes e praticadas pelas principais operadoras de metrô 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; (iii) e medições para detectar os pontos de baixa isolamento elétrica na via, realizadas através de visitas às instalações metroviárias.

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.

Palavras-Chave: Corrente de fuga. Corrosão eletrolítica. Aterramento. Via Permanente.

## **ABSTRACT**

Between 1890 and 1950 numerous studies were conducted by committees and communities of engineers, to identify problems and propose solutions of mitigation. Many mitigation proposals were implemented in new projects, obtaining different results.

This document has the objective of create design recommendations to the track with an approach focusing the track structure and the track longitudinal reinforcement structure 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 and measurements to identify leakage points (low insulation) 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 good recommendations in the 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; (li) the field survey to obtain records of the problems caused by the leakage current; (lii) 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 in the city of São Paulo, 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, 4<sup>th</sup> rail and maintenance yard.

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

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>8</b>
2.1.	CONTEXTO HISTÓRICO .....	8
2.2.	ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA METROVIÁRIO .....	8
2.3.	SISTEMA DE TRAÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA .....	9
<b>2.3.1.</b>	<b>Captação de Energia .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.2.</b>	<b>Circuito de Retorno .....</b>	<b>10</b>
2.4.	TENSÃO DE TOQUE .....	11
2.5.	CORRENTE DE FUGA E CORROSÃO ELETROLÍTICA .....	11
2.6.	VIA PERMANENTE .....	14
<b>2.6.1.</b>	<b>Infraestrutura: .....</b>	<b>14</b>
<b>2.6.2.</b>	<b>Superestrutura:.....</b>	<b>14</b>
<b>2.6.3.</b>	<b>Via Permanente com Lastro .....</b>	<b>15</b>
2.6.3.1.	Dormentes .....	15
2.6.3.2.	Trilhos.....	15
2.6.3.3.	Soldas .....	16
<b>2.6.3.4.</b>	<b>Aparelhos de Mudança de Via.....</b>	<b>16</b>
2.6.3.5.	Fixações .....	16
2.6.3.6.	Lastros.....	18
2.6.3.7.	Sublastro .....	18
2.6.3.8.	Subleito.....	18
<b>2.6.4.</b>	<b>Via Permanente sem Lastro.....</b>	<b>18</b>
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>20</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>21</b>
4.1.	ABORDAGEM GERAL .....	21
4.2.	REGISTROS DOS EFEITOS DA CORRENTE DE FUGA.....	21
<b>4.2.1.</b>	<b>Caso 1 – Elementos de fixação da base de apoio do trilho de rolamento</b>	<b>22</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>Caso 2 – Elementos fixação do trilho e base de apoio .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.3.</b>	<b>Caso 3 – Aparelhos de Mudança de Via .....</b>	<b>24</b>

4.3.	MEDIÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS DE VIA.....	26
4.4.	RECOMENDAÇÕES DE PROJETO PARA VIA PERMANENTE .....	26
<b>4.4.1.</b>	<b>Superestrutura da via permanente .....</b>	<b>26</b>
4.4.1.1.	Via permanente em lastro.....	26
4.4.1.2.	Laje de Concreto Estrutural .....	27
4.4.1.3.	Laje flutuante .....	27
4.4.1.4.	Elementos de Fixação .....	28
<b>4.4.2.</b>	<b>Condutor longitudinal auxiliar para a corrente de fuga .....</b>	<b>29</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>



## 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 isolamento 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 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 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. Também objetiva a síntese de recomendações normativas de projeto de via permanente, focado na superestrutura e condutor longitudinal auxiliar.

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.

As normas internacionais referentes ao sistema de aterramento envolvendo segurança aos usuários, operadores e sistemas, os métodos de prevenção contra corrente de fuga, e a compatibilidade eletromagnética sofreram revisões nos últimos anos, sendo as normas do International Electrotechnical Commission (IEC), neste caso a IEC-62128, que trata das questões envolvendo corrente de fuga entre outros assuntos, as mais recentes, atualizadas em 2013.

## **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).

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.

### **2.2. ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA METROVIÁRIO**

Atualmente, para os sistemas metroviários urbanos, a utilização da corrente contínua é predominante. Basicamente, sua origem foi devido às dificuldades do perfeito sincronismo entre a corrente alternada (monofásica ou trifásica) e o material rodante em conjunto com a viabilidade técnico-econômico e a complexidade da implantação física em sistemas metroviários (PIRES, 2013).

As subestações retificadoras do metrô de São Paulo recebem alimentação em média tensão em Anel devido à alta exigência de confiabilidade e disponibilidade do sistema de alimentação dos trens. Também são responsáveis, exclusivamente, a alimentação dos trens através dos grupos retificadores formados basicamente pelo transformador responsável por rebaixar a média tensão a um nível aceitável do retificador que por sua vez retifica para um nível CC coerente ao material rodante. O polo positivo se conecta a linha de contato (catenária ou terceiro trilho) e o polo negativo se conecta ao trilho de rolamento (PIRES, 2013).

Segundo Pires (2013), para a escolha correta do nível de tensão a ser utilizada para o sistema de tração depende de das seguintes condições:

- Capacidade de Transporte (passageiro/hora/sentido) para determinação da potência necessária para Subestações Retificadoras;
- Definição do material rodante: potencia unitária; tipo de captação de energia;
- Modo de captação de energia do material rodante;
- Tipo de instalação e localização das Subestações;
- Tipo de ambiente susceptível a Interferências eletromagnéticas;
- Viabilidade técnico-econômico;

### 2.3. SISTEMA DE TRAÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

O sistema de tração tem como principal função, na óptica de sistemas metroviários, em conjunto com as linhas eletrificadas e subestações, o transporte de passageiros de forma confiável, segura e sincronizada com o material rodante para sua operação (PIRES, 2013).

As subestações retificadoras são responsáveis por transformar a alimentação elétrica trifásica da média tensão, proveniente do anel, em alimentação elétrica em corrente contínua a um nível de tensão compatível com o material rodante.

### **2.3.1. Captação de Energia**

A linha de contato tem como principal função a distribuição da energia elétrica, fornecidas pelas subestações retificadoras, em todo o percurso do material rodante na linha. Deve ser totalmente compatível com o coletor deslizante do trem (sapata ou pantógrafo) e características das subestações retificadoras (Nível de tensão, corrente e transferência de potência).

### **2.3.2. 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 (PIRES, 2013).

Os trilhos são feitos de aço e 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. Chamamos de corrente de fuga essa parcela da corrente que se divide em meios não previstos para o retorno da corrente (PIRES, 2013).

O Módulo (valor nominal) da corrente de tração depende das características do material rodante, características das subestações retificadoras e de como será a operação da linha (grade horária em função do *headway*; oferta de trens na linha; carregamento; etc).

## 2.4. 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.

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 sistema 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).

## 2.5. 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.

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.

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.

Como auxílio ao estudo do fenômeno da eletrólise segue abaixo a definição segundo Faraday (1834):

- 1ª Lei da Eletrólise: “A massa da substância eletrolisada em qualquer dos elementos é diretamente proporcional à quantidade de carga elétrica que atravessa a solução”;
- 2ª Lei da Eletrólise: “Empregando-se a mesma quantidade de carga elétrica, em diversos eletrólitos, a massa da substância eletrolisada, em qualquer dos eletrodos, é diretamente proporcional ao equivalente-grama da substância”.

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).

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);

A Figura 1 mostra o processo de eletrólise padrão e a Figura 2 mostra os conceitos aplicados no sistema em estudo.

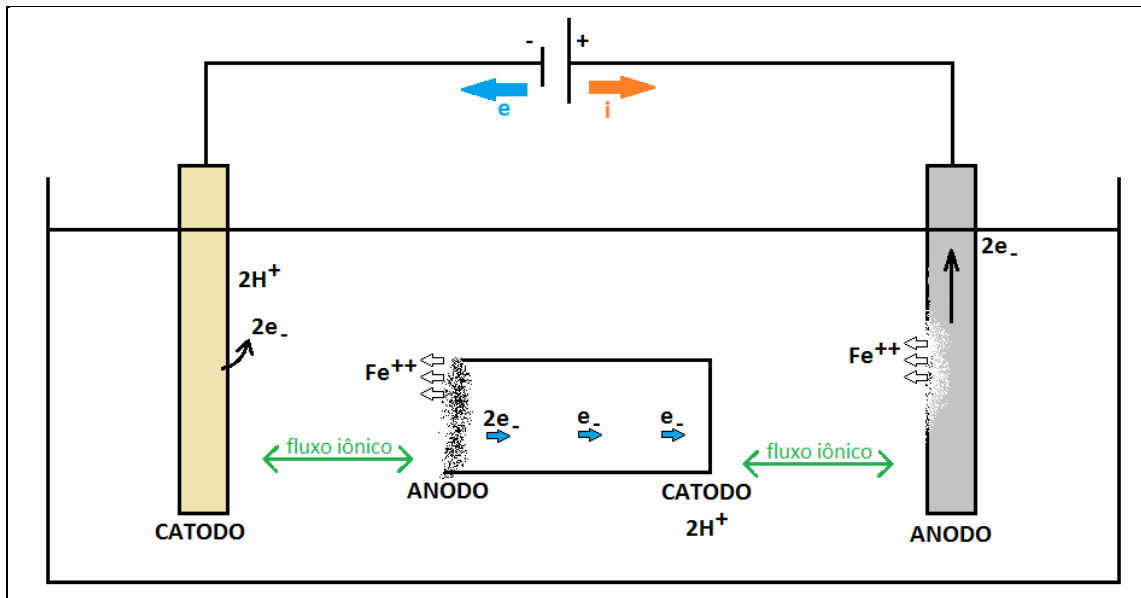


Figura 1 – Modelagem Experimental Corrosão Eletrolítica. Fonte: Domingues (2008).

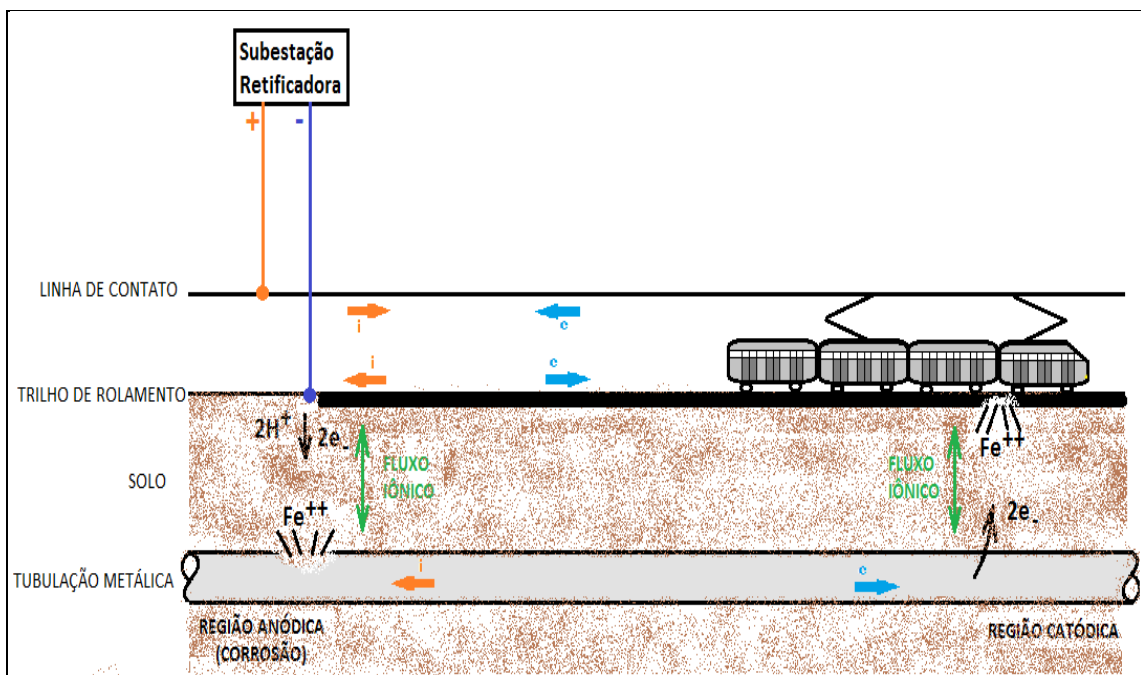


Figura 2 - Modelagem Metroviária: Corrosão Eletrolítica e Corrente de Fuga. Domingues (2008).

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.

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 2ª lei de Faraday.

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.

## 2.6. 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: Orientação do material rodante de forma estável e segura e transmitir as cargas, devido à passagem dos trens, para as funções e solos (KLINCEVICIUS, 2011).

Pode-se dividir a Via Permanente em dois subgrupos, sendo eles a infraestrutura e a superestrutura.

### 2.6.1. Infraestrutura:

Composto 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).

### 2.6.2. Superestrutura:

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).



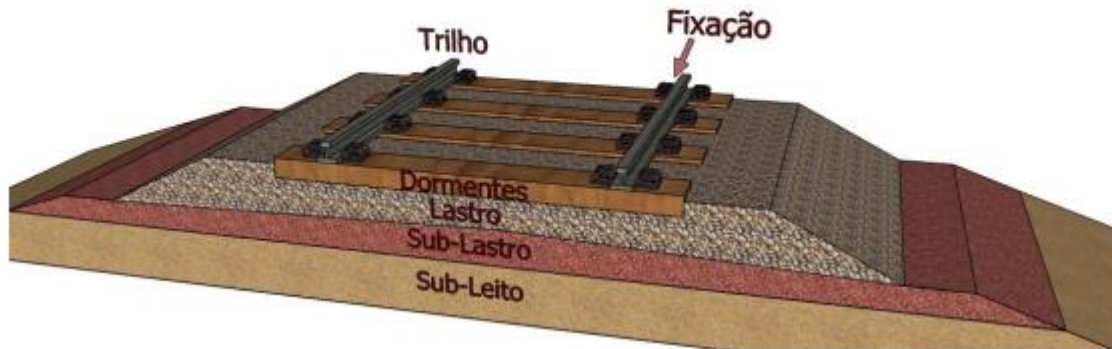


Figura 3 - Estrutura da Via Permanente. Fonte: KLINCEVICIUS (2011)

### 2.6.3. Via Permanente com Lastro

Os principais componentes que formam a Via Permanente Tradicional (com lastro) são:

#### 2.6.3.1. Dormentes

Vigas transversais que apoiam os trilhos e transmitem os esforços pelo lastro. No mercado variados tipos de dormentes com características diferentes no que diz respeito ao custo, durabilidade, manutenibilidade, desempenho, e resistência mecânica. A escolha depende da aplicação e visão estratégica da empresa (STEFFLER, 2013).

#### 2.6.3.2. Trilhos

Os trilhos são responsáveis pelos apoios do material rodante através de contatos roda trilho. 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 como meio pelo qual o sistema de sinalização utiliza 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: Patim; Alma e Boleto.

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).

#### 2.6.3.3. Soldas

No processo de fabricação de um trilho podem-se gerar peças de até 100m de comprimento. Devido a dificuldade logística as peças normalmente são comercializadas com 24m (STEFFLER, 2013).

Com isso vias com quilômetros de extensão utilizaria inúmeras peças de trilhos para formar a via completa. Em sistemas metroviários normalmente utilizamos quatro linhas de trilho para formar duas vias e viabilizar a operação de transportes de passageiros.

Junto com esse grande quantitativo de trilhos são utilizadas as soldas para interligação entre eles e garantir a continuidade da via. Para manutenção de via permanente, um dos principais pontos críticos está na união entre trilhos (STEFFLER, 2013).

Com a criação da solda entre trilhos as juntas ficaram em desuso, com exceção das juntas isolantes que será detalhada mais a diante. Existem três tipos de soldas mais usadas em sistemas metroferroviários: Flash-butt, Aluminotérmica e a Gás.

#### 2.6.3.4. Aparelhos de Mudança de Via

Comumente chamado de AMV, basicamente, são um conjunto de peças que em conjunto realizam a transferência da composição de trens de uma via para outra (STEFFLER, 2013). Dependendo de suas características e posição na via ele limita a velocidade máxima do material rodante.

Existem três tipos de AMV: Simples, Mistos e Híbridos.

#### 2.6.3.5. Fixações

As fixações são componentes que em conjunto formam a união estrutural entre os trilhos e os dormentes ou lajes estruturais (ESVELD, 2001).

Suas principais características são absorver e transmitir todos os esforços dos trilhos para a estrutura de suporte, inclusive para casos de rompimento do trilho e escorregamento do trem (ESVELD, 2001).

Segundo Steffler (2013), existem três tipos de fixações:

- I. Fixação Rígida: Prego, Tirefond Comum e Tirefond Galvanizado.
- II. Fixação Elástica: Diferentemente da fixação rígida, seu contato com o Patim é constante e equilibrado, mesmo após inúmeras vibrações devido à passagem de trens ao longo do tempo.
  - Fixação Deenik: Grampo de aço torcido aplicada sob pressão no Patim. São de aço comum ou galvanizado.
  - Fixação Pandrol: Peça circular de aço torcida. Sua aplicação é realizada longitudinalmente possui menor braço de alavanca e maior resistência comparada ao Deenik.
  - Fixação Vossloh: Comumente empregada em dormentes de concreto. Seu formato faz com através de uma força de tração cause dois pontos de mola e dois pontos de atrito em suas extremidades.
  - Fixação RN: Também utilizado em dormentes de concreto sua fixação é traves do contato com o patim ocorre através de uma chapa dobrada. Sua aplicação é voltada para fins ferroviários pois sua resistência mecânica não apresenta boa eficiência.
  - Fixação Fast Clip: Atualmente é a fixação mais utilizada tanto em sistemas metroferroviários devido a sua alta manutenabilidade. O grampo possui um formato que em conjunto com a base oferece uma fácil instalação no sentido transversal do trilho. Pode ser utilizado em qualquer tipo de dormente.
- III. Fixação Semielástica: Suas características são em partes fixas e outra elástica. Sua aplicação é voltada para ferrovias e existem dois tipos: “GEO” e “Prego Elástico”.

- IV. Fixação Flutuante: Sua característica principal é o modo fixação diretamente na alma do trilho de rolamento deixando-o fora de contato com a estrutura da via permanente. Sua aplicação é voltada para projetos especiais que carecem de pouco impacto ambiental por vibrações e ruídos gerados do material rodante nos trilhos de rolamento.

#### 2.6.3.6. Lastros

Camada formada por brita granular específica que promove uma conformação e assentamento adequado e com isso garante a estabilidade da via permanente. (KLINCEVICIUS, 2011).

#### 2.6.3.7. Sublastro

Camada localizada entre o lastro e o subleito formada por material granular de dimensões menores do que o lastro. Age de como filtro evitando o contágio do solo (subleito) a o lastro (KLINCEVICIUS, 2011).

#### 2.6.3.8. Subleito

Também chamada de plataforma, é a camada mais funda preparada, ou seja, é a fundação da via permanente. Garante a estabilidade da fundação e evita recalques excessivos (KLINCEVICIUS, 2011).

### 2.6.4. Via Permanente sem Lastro

Para via permanente sem lastro a superestrutura é apoiada em uma laje de concreto armado, também chamadas de Slab Tracks. Atualmente, para vias em túneis as lajes de concreto são mais usadas. Atualmente o metro de São Paulo vem utilizando essa tecnologia. Como exemplo temos as linha 4 e 5 do metro de São Paulo utilizam essa tecnologia.

Segundo klincevicus (2011) existem 5 variações de via permanente sobre laje classificadas segundo a disposição dos trilhos e dormentes:

- Embedded Rail: Via embutida;
- Resilient Baseplate: Trilhos Apoiados diretamente na laje e isoladas por placas de borracha.
- Booted Sleeper: Dormentes bibloco com “galocha” de borracha;
- Cast-in Sleeper: Trilho fixado no dormente através de uma base resiliente;
- Floating Slab: O trilho apoia-se em uma laje que por sua vez é apoiada em amortecedores (molas) ou Placas de Borracha;



O metro de São Paulo vem adotando o tipo Floating Slab porem possui dois tipos: Sem amortecimento e com amortecimento (DE CARVALHO, 2015).

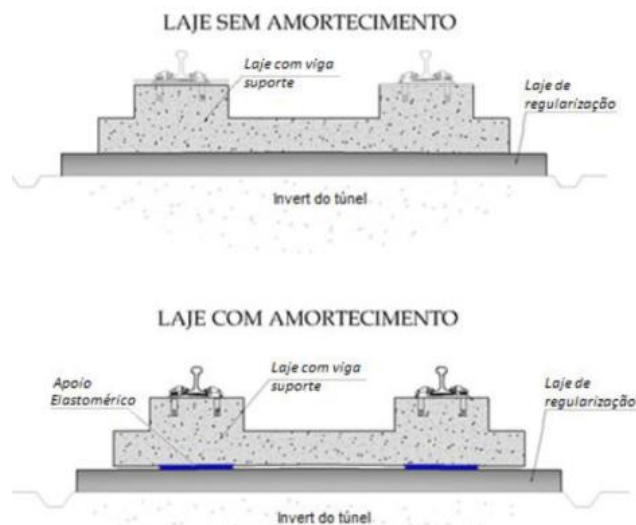


Figura 4 - Lajes flutuantes. Fonte: De Carvalho, 2015.

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia utilizada para formar o produto proposto a esta monografia, divide-se em 3 (três) 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. Medições na via entre o trilho rolante e o terra estrutural para detecção de falhas de isolamento e corrente de fuga;
- III. Estabelecer, para superestrutura e condutor longitudinal auxiliar, 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 a linhas metroviárias para coleta de dados.

Na etapa II, em determinados locais da linha foram realizadas medições na via entre o trilho rolante e o terra estrutural para detecção de falhas de isolamento e corrente de fuga.

Na etapa III foram sintetizadas recomendações de projeto para via permanente, de modo a evitar ou minimizar os danos e níveis de corrente de fuga relatados nas etapas I e II, 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).

Em relação às recomendações de projeto, a IEC 62128-2 descreve que a resistência longitudinal do trilho deve ser baixa, de modo que nos pontos de junção dos trilhos devem ser conectadas juntas de ligação entre trilhos de baixa resistência, de modo que a resistência longitudinal não seja aumentada em mais de 5%.

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 (PIRES, 2014b).

### **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.

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

#### 4.2.1. Caso 1 – Elementos de fixação da base de apoio do trilho de rolamento

Para a via permanente os principais elementos sacrificados são o tirefond (parafuso de fixação da base do trilho de rolamento) e o tambor, devido suas conexões serem diretamente nas bases dos dormentes ou lajes de concreto (flutuante ou não-flutuante).

O primeiro caso pode-se observar na figura 5 abaixo apresenta onde a corrente de fuga ocasionou a perda de material nos elementos metálicos: parafuso, porca e arruela.



Figura 5 - Caso 1: Perda de material nos elementos de fixação. Fonte: O próprio autor, 2016.

No início as perdas de material da via permanente são imperceptíveis a uma inspeção visual das equipes de manutenção, porem quando ocorre à perda da isolação dos elementos de fixação podem gerar sérios danos à integridade do sistema. Normalmente sua detecção é vista após outros problemas envolvidos, porem tardia e normalmente de natureza grave.



Um dos principais problemas secundários está diretamente relacionado com o efeito Joule, ou seja, sobre aquecimento em elementos da via permanente. Com a perda de material (corrosão eletrolítica) os elementos de fixação perdem sua eficiência na pressão exercida para prender o trilho de rolamento no dormente/laje, ou seja, uma queda da resistência é criada e consequentemente a passagem da corrente de fuga gerar calor suficiente para danificar as isolações.

Com a isolação danificada, os efeitos da corrente de fuga deixam de existir, pois parte da corrente de tração é drenada para o terra e estruturas da via. Como os valores das correntes de tração são elevados uma grande quantidade de calor é gerada podendo chegar à fundição do trilho de rolamento conforme podemos observar nos casos abaixo:

#### **4.2.2. Caso 2 – Elementos fixação do trilho e base de apoio**

O segundo caso pode-se observar nas figuras abaixo onde a corrente de fuga se propagou e gerou o efeito Joule comprometendo a isolação do fastclip, base de apoio, placa isolante e até mesmo o patim do trilho de rolamento.



Figura 6 - Caso 2: Base, Placa isolante e Isolação do FastClip. Fonte: O próprio autor, 2016.



Figura 7 – Caso 2: Perda de material e Fusão do Patim. Fonte: O próprio autor, 2016.



Figura 8 - Caso 2: Patim danificado. Fonte: O próprio autor, 2016.

#### **4.2.3. Caso 3 – Aparelhos de Mudança de Via**

O terceiro caso, mostrado na Figura 9 abaixo, apresenta os efeitos da parte da corrente de tração sendo drenada na base de sustentação e fixação do grampo na região do AMV. Nesse caso a isolamento entre a base e o trilho de rolamento foi afetada

ocasionando a perda de material do copo embutido, base de apoio dos grampos e do patim do trilho de rolamento;

As equipes de manutenção em suas atuações corretivas analisam as isolações e descobriram baixa isolação entre o copo embutido na laje flutuante e o trilho de rolamento havendo a necessidade de troca o conjunto.



Figura 9 - Caso 3: Danos causados no Patim do Trilho de Rolamento. Fonte: O próprio autor, 2016.



Figura 10 - Caso 3: Local de instalação da Base do Grampo. Fonte: O próprio autor, 2016.

### 4.3. MEDIÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS DE VIA

Uma forma prática, utilizada pelas equipes de manutenção do Metrô, de se identificar as correntes de fuga e seus problemas secundário é através da injeção de uma fonte de tensão aplicada entre o trilho de rolamento e o terra estrutural da via permanente com medição de corrente que passa pelo circuito.

### 4.4. RECOMENDAÇÕES DE PROJETO PARA VIA PERMANENTE

#### 4.4.1. Superestrutura da via permanente

Conforme visto no item 2.6.2 a superestrutura é o conjunto de elementos responsáveis pela transmissão uniforme de esforços da passagem do trem para a infraestrutura.

Para vias em lastro a superestrutura é formada pelo conjunto sublastro, lastro, dormente, trilho e elementos de fixação. Já para vias sem lastro a superestrutura é formada por concreto de preenchimento (“magro”), laje de concreto estrutural (“invert”), armações, Laje Flutuante, trilho e elementos de fixação.

##### 4.4.1.1. Via permanente em lastro

A recomendação de projeto para vias permanentes em lastro são barras metálicas longitudinais imersas na região preenchida com lastro para criar um caminho de sacrifício de baixa impedância. Porém devido a atividade de manutenção preventiva de troca do lastro de tempos em tempos devido a acúmulo de sujeiras e desgaste das pedras a recomendação mais plausível será a instalação das mesmas na região do sublastro.

#### 4.4.1.2. Laje de Concreto Estrutural

As recomendações de projeto para a laje de concreto estrutural para a corrente de fuga, podem ser resumidas da seguinte maneira (IEC 62128-2, 2013; VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b; CMSP, 2006):

- A resistividade elétrica do concreto da Superestrutura da Via Permanente deve ser maior que  $600\Omega.m$ , após executado e seco (CMSP, 2006; PIRES, 2014b);
- Os ferros estruturais do berço da via terão um recobrimento mínimo de concreto de alta densidade (impermeável e de resistividade superior a  $600\Omega.m$ ) de pelo menos 50 mm, assim como os ferros estruturais do TEE na interface com esta superestrutura no TT. (VDV 501/1, 1993);
- As tubulações embutidas na superestrutura no potencial do terra do túnel devem ser de material isolante, para não comprometer as características elétricas exigidas.
- A laje estrutural ter as dimensões favoráveis para perfeito encaixe para laje flutuante;
- Na região de encaixe com a laje flutuante, ser recoberta por manta isolante elétrica com características de amortização mecânica contra vibrações;
- Conter previsto sistema de drenagem de via como canaletas longitudinais e transversais;

#### 4.4.1.3. Laje flutuante

A laje flutuante é a primeira estrutura civil abaixo das placas de isolamento dos trilhos e portanto onde encontra-se imerso o eletrodos de condução de eventuais correntes de fuga, chamados de Terra do Túnel (TT).

O Metrô de São Paulo especifica, para o berço da via, que o concreto deverá possuir características impermeáveis e a fixação isolante dos trilhos deverá garantir uma resistência elétrica transversal de 10 Ohms.km entre TV e TT (PIRES, 2014b).

As recomendações de projeto para a laje flutuante e minimização de corrente de fuga, podem ser resumidas da seguinte maneira (IEC 62128-2, 2013; VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b; CMSP, 2006):

- A laje flutuante seja construída de forma pré-moldada para minimizar erros de execução durante a obra.
- Receber tratamento superficial contra penetração de umidade devido à característica elétrica de baixa isolamento quando úmido;
- Garantir que as placas de concreto pré-moldadas tenham juntamente a sua armação condutores longitudinais e fácil interligação com a placa adjacente;

#### 4.4.1.4. Elementos de Fixação

As recomendações de projeto para os elementos de fixação e minimização de corrente de fuga podem ser resumidas da seguinte maneira (IEC 62128-2, 2013; VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b; CMSP, 2006):

- Os conjuntos dos elementos de fixação deverão ser de alta resistência elétrica.
- Condutância longitudinal por unidade de comprimento entre trilho e terra deverá ser de 0,05 S/km em túneis secos (VDV 501/1, 1993);
- Condutância longitudinal por unidade de comprimento entre trilho e terra deverá ser de 1 S/km em vias sujeitas a intempéries (VDV 501/1, 1993);
- As características construtivas devem permitir fácil acesso para limpeza dos elementos isolantes, ou seja, o projeto deve evitar condições de acúmulo de sujeira e umidade;
- Os elementos isolantes devem ser de fácil substituição;
- A resistência elétrica transversal dos trilhos da via permanente em relação às armaduras de aço, instaladas no berço das vias para drenagem das correntes de fuga, considerando a possibilidade de degradação elétrica e/ou envelhecimento das

partes isolantes, deverá apresentar, quando do comissionamento, os seguintes valores (PIRES, 2014b):

- para fixação direta, maior ou igual a 200  $\Omega$ .km para via dupla;
- para os aparelhos de mudança de via, maior ou igual a 150  $\Omega$ .km.
- O valor mínimo da resistência elétrica transversal para a via dupla com relação ao terra do túnel (berço da via onde serão instalados as barras chatas para confinamento das correntes de fuga) deverá em todas as condições operacionais e ao longo do tempo, apresentar um valor superior a 30  $\Omega$ .km (PIRES, 2014b);

#### **4.4.2. Condutor longitudinal auxiliar para a corrente de fuga**

Trata-se do sistema constituído pelas barras chatas metálicas interligadas às armaduras das estruturas de concreto que suportam os trilhos das vias, também possuem o nome de Terra do Túnel, apesar de não ser uma referência de terra. Tem por finalidade, confinar as correntes de fuga do sistema de tração em corrente contínua dentro das estruturas do metropolitano, impedindo que estas provoquem corrosão das armaduras das estruturas adjacentes. É constituído por barras chatas interligadas às ferragens estruturais e embutidas no concreto das obras civis que constituem a infraestrutura que suporta a via permanente. A Figura 11 apresenta um corte típico construtivo de via permanente (CMSP, 2006).

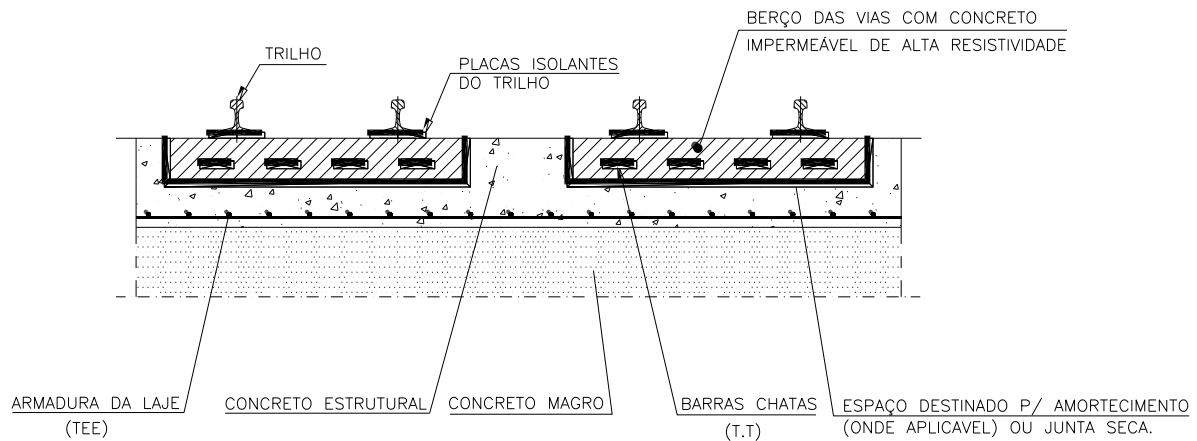


Figura 11 - Configuração da Via Permanente em laje. Fonte: CMSP (2006).

As barras chatas longitudinais, pelo fato de estarem em potencial distinto das demais referências de aterramento dos circuitos de alimentação elétrica e não serem conectadas diretamente às malhas de aterramento das estações limítrofes de cada trecho possuem características de dimensionamento independentes (CMSP, 2006; CMSP, 2010; PIRES, 2014b).

O dimensionamento das barras de aço do Terra do Túnel imediatamente abaixo dos trilhos de rolamento pode ser realizado conforme a recomendação alemã VDV 501/1 e preceitos gerais da norma IEC 62128-2 (2013), cuja seção mínima exigida é de 400 mm<sup>2</sup> de aço por via (VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b).

Estas barras devem ser consideradas adicionais às necessidades estruturais dos berços das vias e soldadas às ferragens destes (IEC 62128-2, 2013; VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b).

Observa-se que as quatro barras de aço da Figura 11 devem atender a seção de 400 mm<sup>2</sup> por via conforme recomendação da VDV 501/1 (1993).

Pontos de medição espaçados ao longo da via, para análise do sistema ao longo de sua operação são imprescindíveis. No Metrô de São Paulo, utilizam-se as barras chatas longitudinais soldadas a cada 1 metro, onde aplicável, e amarradas a cada meio metro quando não for possível fazer soldas às ferragens das lajes, visando garantir a



continuidade elétrica entre as barras e as ferragens da obra civil independentes (CMSP, 2006; PIRES, 2014b).

Nas juntas soldas e de concretagem, a continuidade elétrica das barras chatas transversais deverão ser realizadas por cordoalhas de cobre. As cordoalhas devem ter a seção mínima em conformidade com a seção da barra chata a ser interligada, segundo a VDV 501/1 35 mm<sup>2</sup> de cobre, sendo que cada cordoalha deve ser considerada independente e a conexão dupla deve ser considerada uma redundância deste sistema. A Figura 12 ilustra o sistema de cordoalhas descrito (IEC 62128-2, 2013; VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b; CMSP, 2006).

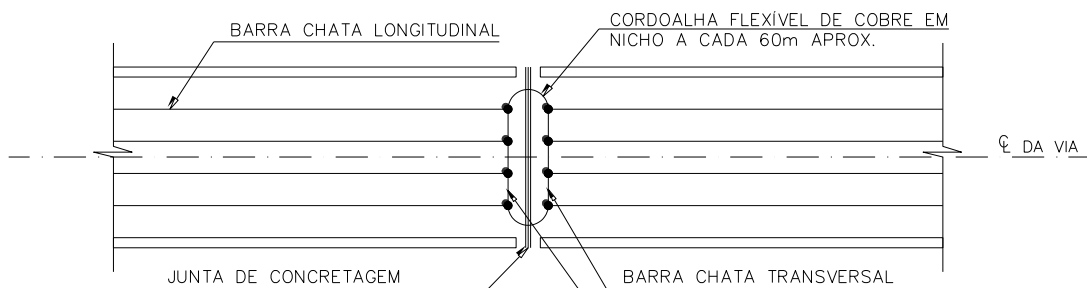


Figura 12 - Configuração da Via Permanente em laje. Fonte: CMSP (2006).

O sistema de conexão entre as cordoalhas é igualmente importante, uma vez que conexões mecânicas de baixa qualidade apresentam uma resistência elétrica alta para o circuito, o que influencia negativamente para eficiência do Terra do Túnel, e consequentemente para o Sistema de Minimização e Prevenção de Corrente de Fuga. Deste modo, a conexão deve ser realizada preferencialmente com solda, uma vez que este representará uma menor resistência elétrica ao circuito e necessita de uma menor frequência de manutenção (IEC 62128-2, 2013; VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b; CMSP, 2006).

A Figura 13, apresenta um exemplo de estrutura de via com a barra de aço em seu interior (MENON, S. A.; FROMME, P., 2014).

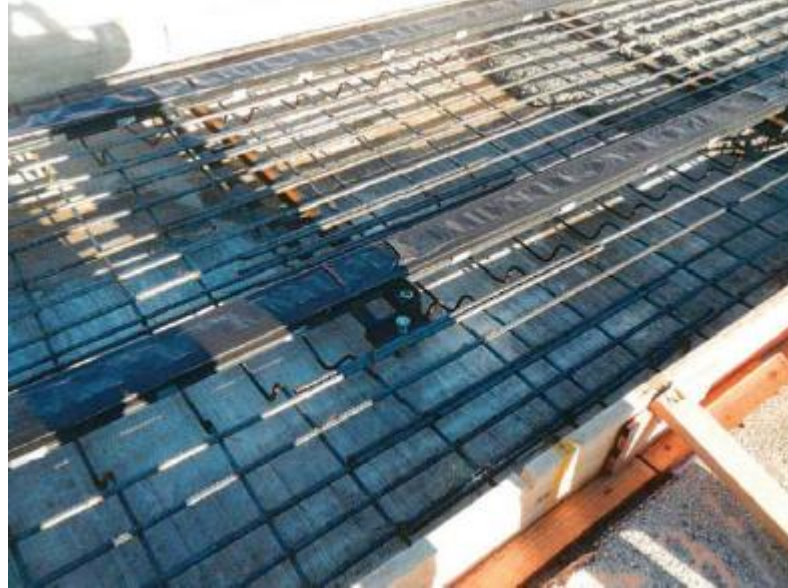


Figura 13 – Exemplo de barra longitudinal na ferragem da base da via. Fonte: Menon e Fromme (2014).

As recomendações de projeto para o condutor longitudinal auxiliar para a corrente de fuga, podem ser resumidas da seguinte maneira (IEC 62128-2, 2013; VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b; CMSP, 2006):

- A seção transversal do reforço estrutural da base da superestrutura da via deverá ser de no mínimo  $400 \text{ mm}^2$  por via singela (VDV 501/1, 1993);
- Nos pontos de derivação com cordoalha de cobre, a seção da cordoalha não poderá ser inferior a  $35 \text{ mm}^2$  (VDV 501/1, 1993);
- Resistência longitudinal do Terra do Túnel deverá ser de  $0,11 \text{ } \Omega/\text{km}$  (VDV 501/1, 1993);
- As barras longitudinais de condução de corrente de fuga não devem ser levadas em consideração no cálculo estrutural da superestrutura (VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b; CMSP, 2006);
- No momento da execução, deve-se garantir a continuidade elétrica de todo o terra do túnel (PIRES, 2014b).

## 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 à superestrutura da via permanente e todos os elementos que a compõem, tais como: laje estrutural, laje flutuante (berço), elementos de fixação, condutor longitudinal auxiliar e trilho de rolamento.

As recomendações de projeto para a laje flutuante e minimização de corrente de fuga, podem ser resumidas através da garantia de uma boa isolação proporcionada pela laje flutuante, e elementos de fixação, além de um bom sistema de drenagem de via, para evitar acúmulos de água que provoquem baixa isolação dos materiais. (IEC 62128-2, 2013; VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b; CMSP, 2006).

Em relação ao condutor longitudinal auxiliar para a corrente de fuga, também chamado de terra do túnel (TT), a VDV 501/1 (1993) estabelece valores resistência longitudinal de  $0,11 \Omega/\text{km}$ . As barras longitudinais auxiliares não devem ser levadas em consideração no cálculo estrutural da superestrutura (VDV 501/2, 1993; PIRES, 2014b; CMSP, 2006).

O trabalho permitiu observar que, dentre todos os parâmetros envolvidos em um sistema de minimização de corrente de fuga, impedir que a corrente de fuga deixe o trilho, é o fator prioritário de todo o sistema de minimização de corrente de fuga, uma vez que ao deixar o trilho, um ponto de corrosão é criado, 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 atravessa 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 isolamento 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.

Os métodos de minimização de corrente de fuga focam hoje, principalmente no desenvolvimento dos materiais que compõem o sistema. Tendo estes, uma tendência ao aumento de isolamento dos mesmos. Ainda que, os procedimentos construtivos, sejam vitais para o correto funcionamento do sistema.

Aos próximos trabalhos nesta área, cabe a avaliação da implantação de sistemas alternativos, como 4º trilho e lajes flutuantes pré-moldadas, com viabilidade construtiva e de implantação, avaliando o custo de implantação em comparação ao custo de manutenção gasto atualmente para manter o sistema metroviário operacionalmente seguro.

## REFERÊNCIAS

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.

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](http://www.flickr.com/photos/metrosp_oficial/albums/72157650203058318)> Aceso 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).

DE CARVALHO, J. T. **Comportamento Dinâmico de Lajes Flutuantes de Vias Permanentes em Sistemas Metroferroviários**. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Estruturas, São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-21052015-115006/en.php>>.

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.

ESVELD, C. Modern Railway Track. Zaltbommel: **MRT-Productions**, 2001. 87 p.

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.

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.

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.

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.

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