



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

AUMENTO DA CONFIABILIDADE DOS BONDES DE IMPEDÂNCIA
MITIGANDO VIBRAÇÕES COM O USO DE CORDOALHAS (1201)

INTRODUÇÃO

A operação metroferroviária moderna exige elevada disponibilidade de ativos de sinalização, em especial daqueles diretamente envolvidos na detecção da ocupação da via e no retorno seguro da corrente elétrica de tração. Dentro dessa arquitetura funcional, os bondes de impedância constituem elementos relevantes para a segregação elétrica entre circuitos, para o retorno de corrente e para a manutenção da sensibilidade operacional dos sistemas de sinalização. Uma falha nesses ativos ultrapassa a esfera



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

estritamente patrimonial e pode afetar a regularidade operacional, a confiabilidade do sistema e a carga de trabalho das equipes de manutenção.

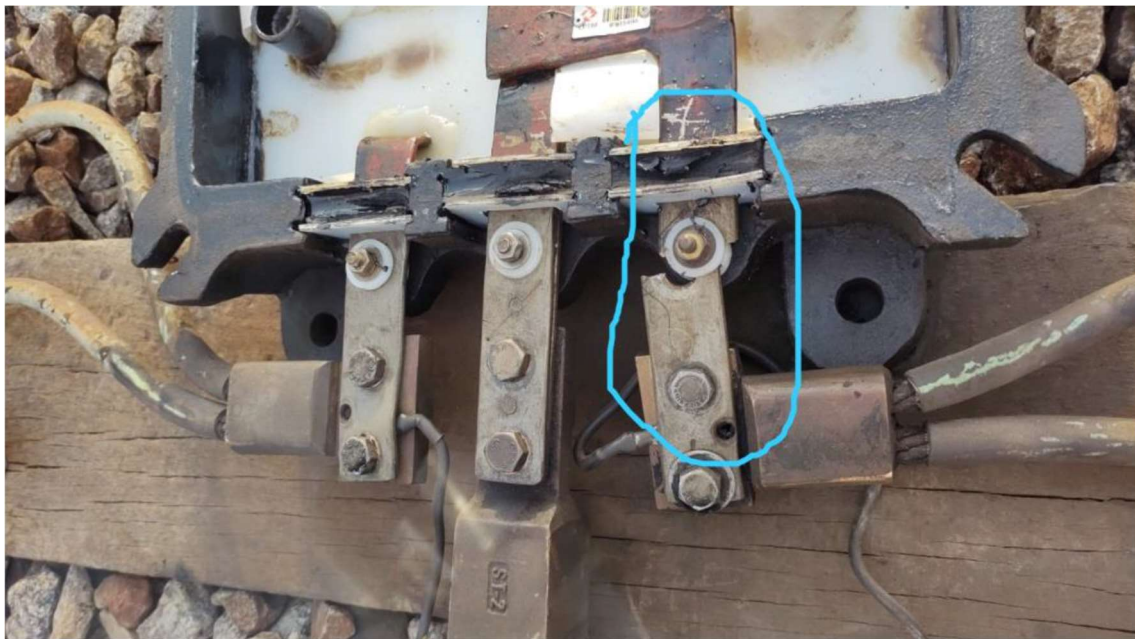


Figura 1 – bonde de impedância (Fresinbra) instalado entre-trilhos com terminal quebrado (2024). Fonte: CPTM

No universo de defeitos registrados em bondes de impedância no período de janeiro de 2020 a maio de 2025, foram anotadas 128 falhas, distribuídas entre diferentes modos de ocorrência. Nesse conjunto, os defeitos por fixação e por quebra de terminal apareceram com a mesma representatividade quantitativa — 39 casos cada — correspondendo individualmente a 30,5% do total de ocorrências. Em seguida aparecem vandalismo (19 ocorrências; 14,8%), tampa avariada (11; 8,6%), outros (10; 7,8%), baixa isolamento (5; 3,9%) e garantia (5; 3,9%). Esse comportamento evidencia que a quebra de terminal não pode ser tratada como evento aleatório ou residual, mas sim como um



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

modo de falha com criticidade estatística e operacional suficiente para justificar tratamento específico de engenharia.

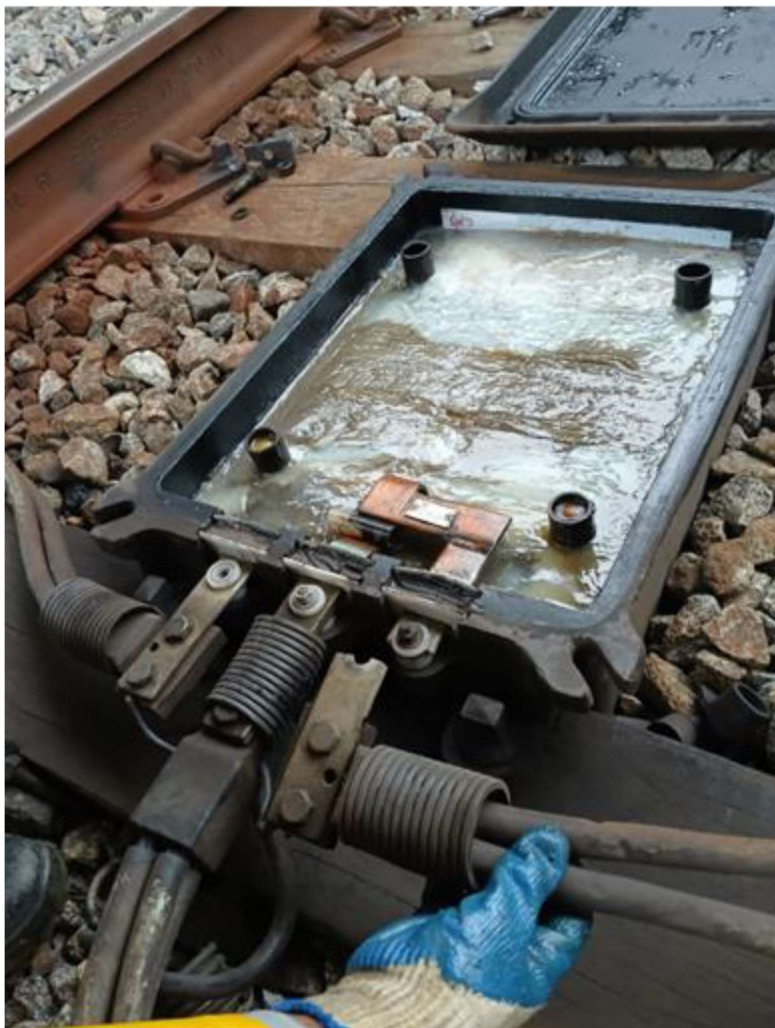


Figura 2 – bonde de impedância (Fresinbra) instalado entre-trilhos com terminal quebrado (2025). Fonte: CPTM

O crescimento anual da quantidade de quebras de terminal reforça essa interpretação.

O histórico consolidado mostra 2 falhas em 2020, 2 em 2021, 5 em 2022, 6 em 2023, 14



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

em 2024 e 10 falhas apenas entre janeiro e maio de 2025. Mesmo sem considerar o ano de 2025 completo, a tendência observada aponta agravamento da incidência desse modo de falha, com impacto crescente sobre a disponibilidade dos circuitos de via e sobre o esforço corretivo da manutenção.

Qtd de falhas de quebra de terminal de bonde por ano

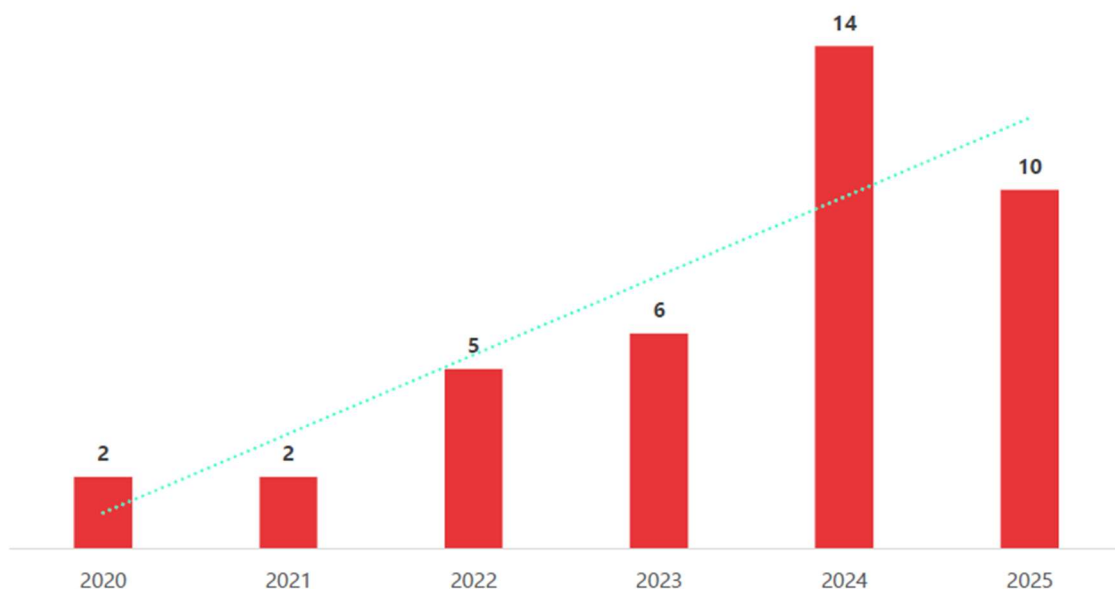


Figura 3 – falhas envolvendo bondes de impedância de 01/2020 até 05/2025. Fonte: CPTM

Outro aspecto crucial é a diferença entre a distribuição do parque instalado e a distribuição das falhas. O sistema possui 2250 bondes de impedância, dos quais 1.622 são do modelo Fresinbra (72,1%), 433 Cobrasma (19,2%), 140 Cosmo (6,2%) e 55 Westinghouse (2,4%).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

MODELO	QUANTIDADE	% DO PARQUE
FRESIMBRA	1622	72,1%
COBRASMA	433	19,2%
COSMO	140	6,2%
WESTINGHOUSE	55	2,4%
TOTAL DE BONDES DE IMPEDÂNCIA	2250	100%

Figura 4 – parque de bondes de impedância. Fonte: CPTM

Em termos de posicionamento na via, 2024 unidades, aproximadamente 90% do total, estão instaladas na lateral da via, enquanto apenas 226 unidades, equivalentes a cerca de 10%, estão instaladas entre os trilhos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 5 – modelos de bondes de impedância por linha. Fonte: CPTM

Ainda assim, as falhas estudadas se concentram justamente no universo mais crítico dos ativos entre trilhos, revelando que o problema não decorre apenas da quantidade de equipamentos em serviço, mas principalmente das condições de solicitação mecânica às quais determinados ativos estão submetidos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Posição dos bondes em relação a via

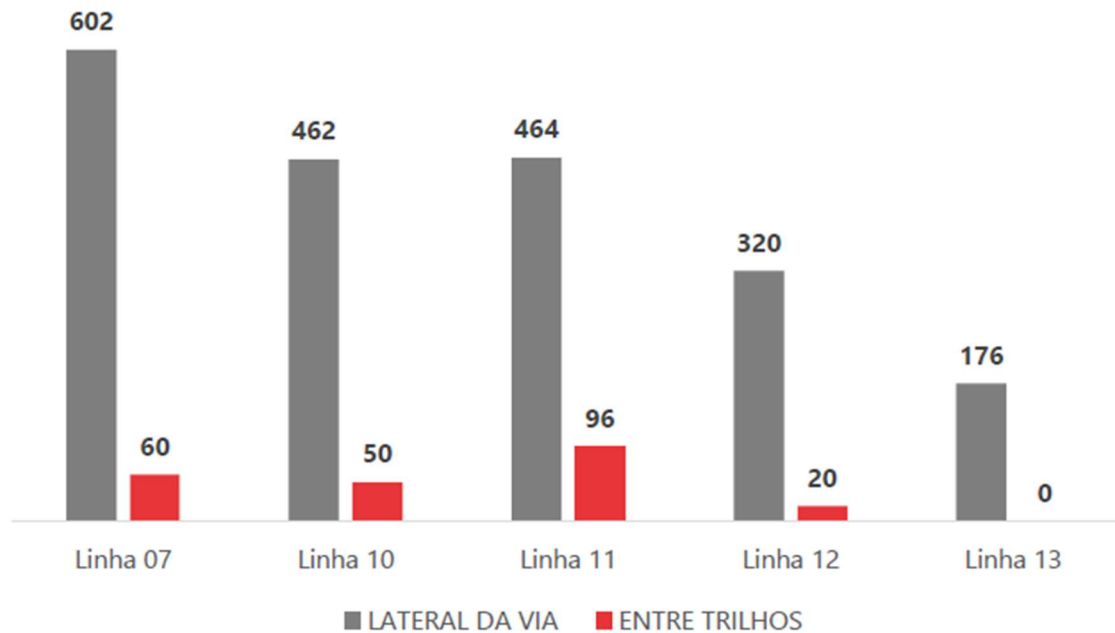


Figura 6 – posição dos bondes em relação a via. Fonte: CPTM

Na distribuição por linhas, a Linha 11 se destaca por concentrar 560 bondes Fresinbra instalados entre-trilhos, configurando o ambiente de maior criticidade para esse modelo e para esse tipo de instalação. Em coerência com essa configuração, o levantamento das 39 falhas por quebra de terminal apontou 34 ocorrências na Linha 11, contra 2 na Linha 07, 3 na Linha 12 e nenhuma ocorrência nas Linhas 10 e 13. Essa concentração confere prioridade inequívoca à Linha 11 dentro da estratégia de mitigação.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

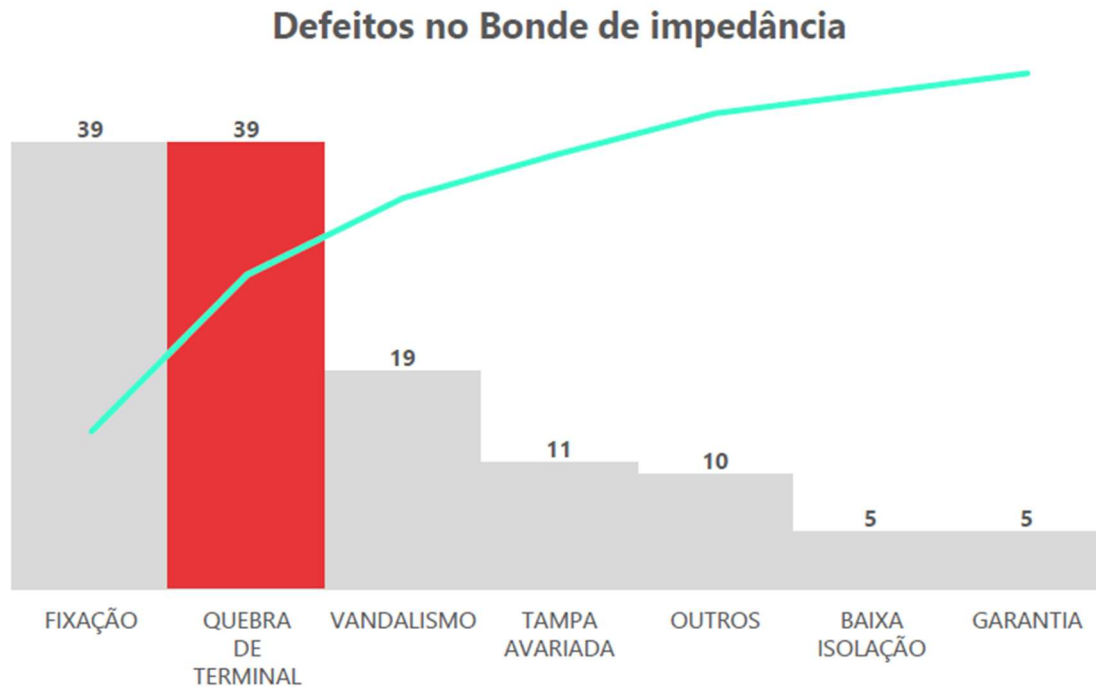


Figura 7 – gráfico de Pareto sobre defeitos no bonde de impedância. Fonte: CPTM

A motivação formal do estudo decorreu da solicitação de análise de causa raiz da falha nº 18861/2025, referente a terminal quebrado em bonde de impedância no circuito 3ET da UR19, via 3. A partir desse evento, a engenharia ampliou a investigação para todo o histórico de falhas e estruturou uma análise orientada por evidências, articulando dados históricos, inspeções em campo e avaliação das ações corretivas anteriormente implantadas.

Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo apresentar o diagnóstico técnico das falhas de quebra de terminal em bondes de impedância instalados entre trilhos, discutir os principais fatores causais, analisar os resultados obtidos no processo investigativo e



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

propor uma solução de mitigação com potencial de elevar a confiabilidade do sistema. A ênfase recai sobre a substituição dos cabos laterais convencionais por cordoalhas de cobre estanhado, associada a melhorias complementares nas condições de instalação e no controle das variáveis de infraestrutura da via.

Contextualização Técnica do Problema

Os bondes de impedância utilizados no sistema analisado apresentam basicamente duas capacidades de condução de corrente: 1000 A e 1500 A. A forma de instalação depende do tipo construtivo e do espaço físico disponível na via. Bondes de 1000 A podem ser instalados entre trilhos, normalmente sobre dormentes de madeira, enquanto equipamentos instalados na lateral da via podem ser dispostos em estruturas metálicas ancoradas sobre base de concreto, recebendo tanto os modelos de 1000 A quanto de 1500 A.

Essa diferença arquitetônica não é apenas geométrica: ela altera o regime de carregamento mecânico incidente sobre o equipamento. Os bondes entre trilhos ficam posicionados em uma região estruturalmente mais sensível às vibrações induzidas pela passagem dos trens, especialmente quando há degradação da superestrutura da via permanente, falta de suporte adequado sob dormentes, deslocamentos localizados e solapamento. Já os instalados lateralmente tendem a operar em condição estrutural mais estável, por estarem desacoplados do núcleo dinâmico da via.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

As inspeções descritas no relatório técnico registraram sinais compatíveis com esse quadro: quantidade insuficiente de brita sob bonde de impedância, deslocamento do ativo em relação ao dormente, além de solapamento de dormentes em pontos com reincidência de falha. Tais indícios permitem inferir que a carga dinâmica observada nos terminais não é consequência de um fator único, mas de uma combinação entre posicionamento crítico do ativo, condições locais da infraestrutura e características mecânicas do conjunto de ligação elétrica.



Figura 8 – brita insuficiente sob o bonde de impedância. Fonte: CPTM



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 9 – bonde deslocado. Fonte: CPTM



Figura 10 – solapamento de dormentes. Fonte: CPTM



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Também merece destaque o fato de que o terminal de conexão elétrica, por ser constituído em cobre ou material não ferroso equivalente e por possuir seção mecânica mais vulnerável que o restante do conjunto, tende a agir como ponto de concentração de tensões. Em uma estrutura submetida a vibração cíclica, qualquer região com menor resistência à flexão ou à fadiga se torna candidata natural à ruptura prematura quando a dissipação de energia mecânica não ocorre adequadamente ao longo do sistema. Essa interpretação foi explicitamente adotada nos documentos de base da análise de causa raiz.

DIAGNÓSTICO

Levantamento do parque e criticidade operacional

O primeiro eixo do diagnóstico consistiu em compreender a composição do parque de bondes de impedância em operação. O levantamento mostrou um total de 2250 unidades na CPTM, com predominância clara do modelo Fresinbra, responsável por 72,1% do parque, o que naturalmente direciona o olhar da manutenção para esse fabricante quando se avaliam políticas de estoque, ações preventivas e estratégia de confiabilidade. Entretanto, a simples predominância do modelo não explica, por si, a



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

incidência das falhas observadas. Para isso, foi necessário cruzar o parque instalado com a posição do ativo na via e com a linha em que ele opera.

A distribuição por linha evidenciou, por exemplo, que a Linha 11 reúne a maior concentração de bondes Fresinbra instalados entre trilhos, com 560 unidades, condição que já a posiciona como ambiente sensível. Em termos de posição relativa à via, os gráficos do levantamento mostraram que essa linha possui o maior volume absoluto de equipamentos entre trilhos, reforçando a hipótese inicial de maior exposição à vibração estrutural.

Histórico das falhas

O histórico consolidado de falhas entre 2020 e 2025 permitiu uma visão mais precisa da criticidade do problema. Entre todas as ocorrências relacionadas a bondes de impedância, a quebra de terminal respondeu por 39 eventos, configurando um dos dois principais modos de falha do conjunto analisado. Quando observada a evolução anual, percebe-se tendência de aumento, com forte aceleração em 2024 e manutenção de patamar elevado em 2025, mesmo sem fechamento completo do ano. Essa progressão temporal é compatível com fenômeno de degradação acumulativa ou com agravamento das condições dinâmicas locais.

O detalhamento das 39 falhas mostrou que elas se distribuíram por 27 circuitos de via distintos, e que 7 desses circuitos apresentaram reincidência. Esse dado é particularmente importante, pois afasta a hipótese de aleatoriedade pura e aponta para



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

pontos ou condições sistêmicas persistentes. Além disso, o fato de haver reincidência em circuitos específicos sugere que determinadas combinações entre geometria da via, posicionamento do bonde, rigidez de ligação e comportamento do tráfego podem formar “zonas de vulnerabilidade” estrutural permanente.

Concentração espacial do problema

O diagnóstico espacial mostrou um resultado ainda mais eloquente: 34 das 39 falhas ocorreram na Linha 11. Em escala mais refinada, 33 dessas falhas concentraram-se no trecho da Cabine de Rotas, entre UR19 e ISP, ao longo de aproximadamente 3 km entre os quilômetros 5+500 e 8+500. Em termos relativos, isso corresponde a 84,6% do total de falhas por quebra de terminal em uma fração limitada da malha analisada. Essa densidade de ocorrência não é compatível com fenômeno distribuído aleatoriamente; ao contrário, ela caracteriza um cluster geotécnico-operacional que precisa ser tratado como região crítica de confiabilidade.

Do ponto de vista operacional, a concentração nas vias 1 e 3 da Linha 11 também é significativa, pois indica que o fenômeno não se limita a um único circuito ou ativo isolado, mas se associa a um contexto de infraestrutura, carregamento e/ou dinâmica de via. Os mapas produzidos no material de base permitem localizar os pontos de recorrência e, portanto, oferecem boa plataforma para uma futura priorização de intervenções por criticidade.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Reincidência por ativo

A análise individual por bonde mostrou que alguns circuitos de via acumulam sucessivas quebras. O caso mais expressivo é o do P492-1ET, lado T, via 1, com 5 falhas acumuladas. Outros casos relevantes incluem A4DT (4 falhas), 2DT (3 falhas), 1BT (2 falhas), A2DT (2 falhas), A2ET (2 falhas) e P492-3ET (2 falhas). Em termos de engenharia de confiabilidade, esses ativos deixam de ser apenas equipamentos com ocorrência repetida e passam a funcionar como “sentinelas” do fenômeno: sua reincidência ajuda a revelar as condições em que o sistema entra em regime de dano acelerado.

Reincidência de falhas por bonde

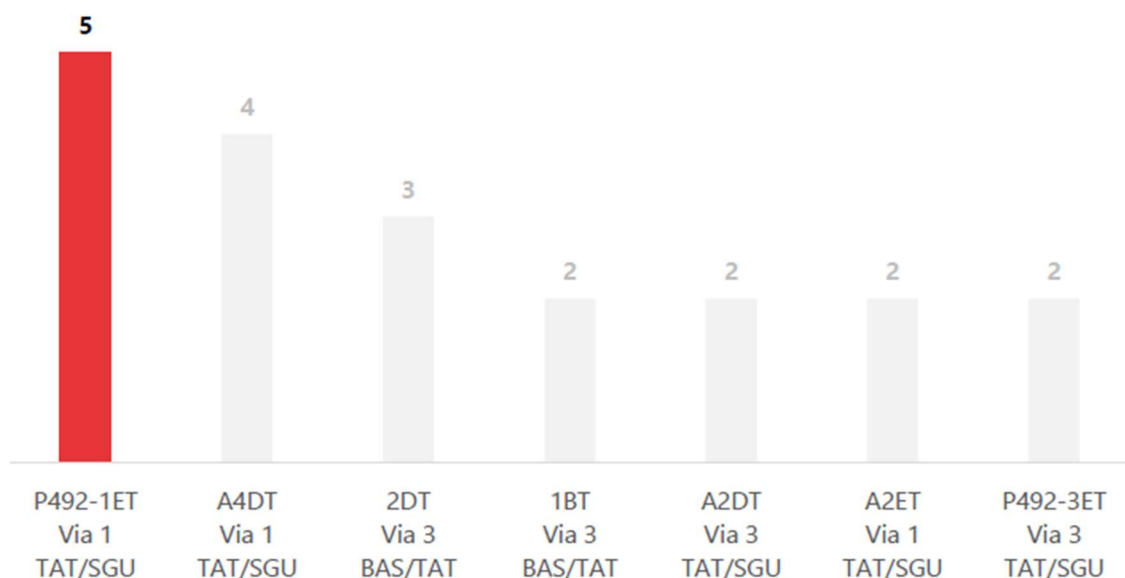


Figura 11 – reincidência de falhas por bonde de impedância. Fonte: CPTM



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Limites da solução anterior

Antes da hipótese atual ganhar força, houve intervenção orientada pela interpretação de que a deficiência de fixação seria o fator predominante. No início de 2024, o DOFS solicitou estudos para melhoria da fixação dos bondes de impedância, resultando na adoção de tirefão com cabeça otimizada. Segundo o levantamento, 18 bondes Fresinbra nesse trecho foram fixados dessa forma, correspondendo a 16,4% do total de bondes instalados no local.

Entretanto, os resultados não confirmaram eficácia suficiente da medida como solução definitiva: 8 dos 18 bondes fixados apresentaram pelo menos uma nova quebra de terminal após a intervenção. Em alguns casos, o intervalo entre falhas diminuiu após a fixação, como no P492-1ET, que acumulou três novas quebras em intervalos de aproximadamente 100 e 70 dias após a ação, enquanto antes o intervalo havia sido de 21 meses entre falhas. Também houve recorrência em 2DT, A2ET, 1BT, A10EAT, A2ECT, A12EAT e 4DAT. Esses resultados são fundamentais para o diagnóstico, pois indicam que a fixação, embora possivelmente necessária, não atua sobre a causa mecânica principal da ruptura.

Inspeção de campo e evidências físicas

As inspeções em campo agregaram elementos visuais e físicos ao diagnóstico analítico. Foram observadas condições como quantidade insuficiente de brita sob alguns bondes,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

deslocamento do equipamento e solapamento de dormentes em pontos críticos. Tais evidências se alinham à hipótese de excitação vibratória anormal transmitida ao conjunto bonde–cabos–trilhos–fixações. Em sistemas sujeitos a repetidas cargas dinâmicas, pequenas instabilidades de apoio podem amplificar deslocamentos relativos e induzir tensões alternadas em pontos de baixa resistência mecânica. Nesse cenário, o terminal do bonde deixa de ser apenas um elemento elétrico e passa a ser peça submetida a um regime severo de fadiga.

Metodologia de Investigação

A metodologia adotada pela engenharia foi um Processo Estruturado de Análise de Causa Raiz (ACR), tido como abordagem sistemática e disciplinada voltada a investigar fatores fundamentais do problema, superando a análise de sintomas imediatos. A adoção desse método foi decisiva para evitar conclusões apressadas, como atribuir o defeito exclusivamente à falta de fixação, e permitiu uma abordagem multidisciplinar baseada em evidências.

A investigação foi organizada em quatro etapas principais. A primeira consistiu na consolidação do histórico de falhas, com classificação por tipo de defeito, linha, circuito, data e localização. A segunda envolveu a correlação dessas falhas com o parque de equipamentos, considerando modelo, posição na via e distribuição por linha. A terceira etapa concentrou-se na análise de reincidência e no mapeamento espacial das falhas em trecho crítico, permitindo identificar agrupamentos geográficos e ativos



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

repetidamente afetados. Por fim, a quarta etapa reuniu inspeções de campo e avaliação das medidas já adotadas, especialmente a melhoria de fixação executada em 2024.

Do ponto de vista lógico, a ACR evoluiu de um raciocínio descritivo para um raciocínio causal. Inicialmente, foi constatado o que falhava, onde falhava e com que frequência. Em seguida, investigou-se em que condição construtiva e operacional os equipamentos falhavam. Por fim, examinou-se porque a ação corretiva anterior não foi suficiente, etapa indispensável para isolar a variável dominante do problema. Esse encadeamento fortalece a robustez técnica das conclusões apresentadas.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Interpretação sistêmica da falha

Os resultados da investigação conduzem a uma interpretação sistêmica da quebra de terminal. A falha não decorre de defeito pontual de fabricação do bonde, tampouco apenas de fragilidade do terminal em si. O problema emerge da interação entre:

1. **posição do equipamento entre trilhos**, mais exposta ao núcleo de vibração da via;



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2. **condições locais da via permanente**, incluindo apoio, brita, estabilidade do dormente e deslocamentos;
3. **rigidez e massa do cabo lateral atual**, que favorecem a transmissão de esforços ao terminal;
4. **geometria resistente do terminal**, que concentra tensões e responde como elo sensível do conjunto.

Do ponto de vista da mecânica dos sólidos e da análise estrutural dinâmica, o conjunto montado na via permanente comporta-se como um sistema de alta impedância mecânica, caracterizado analiticamente como um sistema massa-mola.

Nesta modelagem, o corpo do bonde e os cabos associados constituem os elementos de massa, enquanto a flexibilidade residual do cabo e do suporte atua como o componente elástico (mola). Quando os trens trafegam pelo trecho de alto fluxo como a Cabine de Rotas, as severas vibrações impostas excitam continuamente este sistema mecânico próximo das suas frequências naturais de ressonância.

Como o terminal elétrico dos cabos laterais representa, geometricamente, a menor seção útil e o ponto de menor resistência mecânica de toda a cadeia estrutural, ocorre um fenômeno severo de concentração de tensões (*stress concentration*) na sua zona de transição. A submissão contínua a estes ciclos repetidos de deformação plástica e elástica alternada desencadeia um processo acelerado de ruptura por fadiga mecânica ou esforço dinâmico excessivo. Sem capacidade de dissipação energética condizente, o metal atinge o seu limite de resistência à fadiga, originando microfissuras que se



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

propagam até à separação total do terminal, interrompendo a corrente de retorno e colapsando o circuito de via.

Por que a fixação sozinha não resolveu

A solução anterior buscou restringir deslocamentos do bonde por meio de uma fixação mais robusta. Em tese, a medida poderia reduzir parte do movimento relativo do equipamento. Contudo, os resultados mostraram que a melhoria da fixação atuou apenas sobre um dos sintomas do sistema, sem eliminar a transmissão energética que chega aos terminais. Se o cabo lateral continua rígido e relativamente pesado, ele pode funcionar como transmissor direto da vibração residual, mesmo quando o corpo do bonde está mais firmemente preso ao dormente.

Além disso, em sistemas vibratórios, o aumento localizado de rigidez nem sempre reduz o dano global; em alguns casos, apenas desloca a solicitação para o ponto vizinho mais frágil. Isso explica por que determinados ativos voltaram a falhar após a fixação e, em alguns casos, com intervalos menores. Em outras palavras, a nova fixação pode ter reduzido a mobilidade de parte do conjunto, mas sem oferecer alternativa adequada de dissipação de energia, fazendo com que o terminal continuasse recebendo solicitação cíclica elevada. Essa interpretação é compatível com os dados de recorrência pós-intervenção.

Vantagens técnicas da cordoalha de cobre estanhado



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A solução proposta consiste em substituir o cabo misto lateral de 120 mm² por cordoalhas de cobre estanhado de 200 mm², inspiradas na aplicação de aterramento e interligação do negativo em truques dos trens da série 8500. Os truques ferroviários constituem uma das regiões de maior agressividade dinâmica de uma composição, estando sujeitos a severos e contínuos esforços de torção, translação, impactos verticais e vibrações harmônicas de alta frequência decorrentes do contato roda-trilho em velocidade de cruzeiro. Para assegurar a continuidade elétrica do retorno de tração e aterramento nesses truques sem que ocorra a ruptura dos condutores, utilizam-se cordoalhas chatas trançadas de cobre estanhado de alta flexibilidade.

Para equivalência de condução elétrica, recomenda-se duas cordoalhas para cada ligação bonde–trilho. Essa alternativa apresenta potencial de desempenho superior por combinar **menor massa, maior flexibilidade e maior tolerância a solicitações dinâmicas.**



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 12 – cordoalha montada com terminais de conexão do bonde e trilho. Fonte: CPTM



Figura 13 – cordoalha montada com terminais de conexão do bonde e trilho. Fonte: CPTM



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

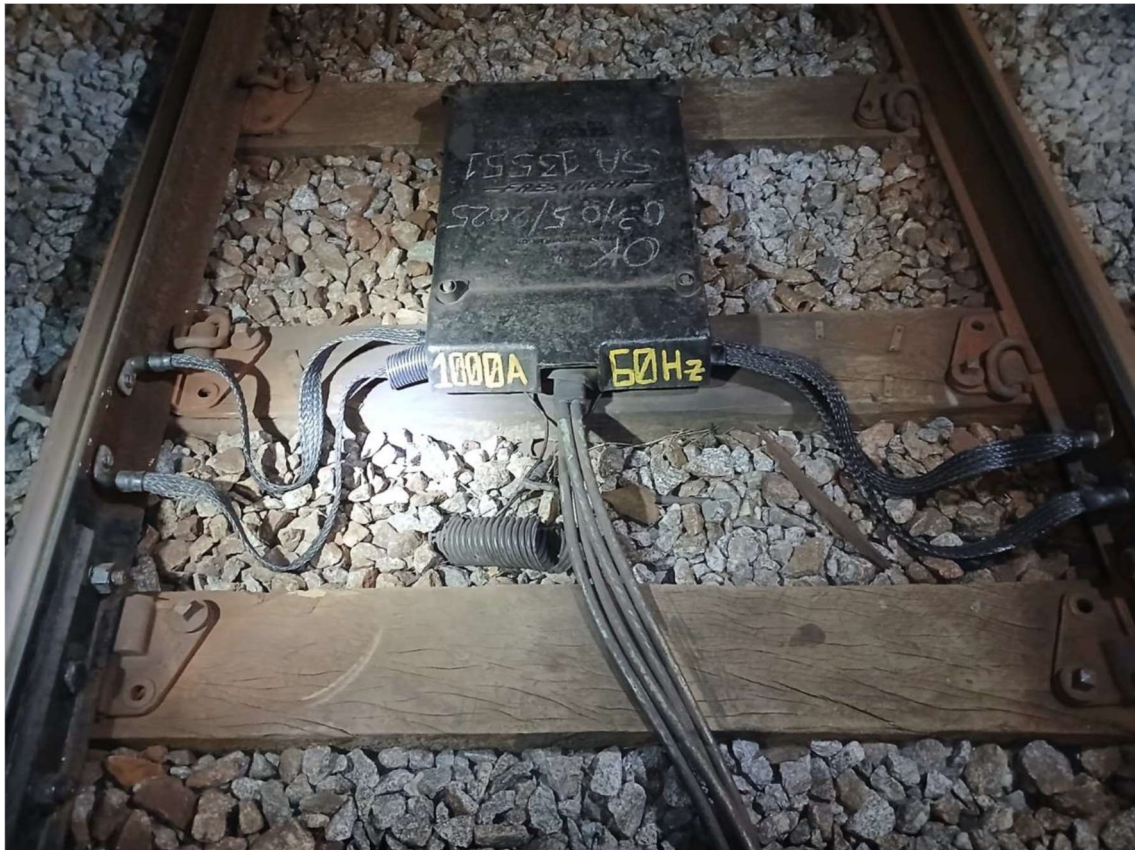


Figura 14 – bonde de impedância com cordoalhas para testes em campo. Fonte: CPTM

O cabo lateral montado pesa aproximadamente 10 kg, enquanto o conjunto equivalente de cordoalhas pesa cerca de 4 kg. Essa redução aproximada de 60% na massa tem implicações diretas no comportamento dinâmico: componentes mais leves tendem a impor menores esforços inerciais sobre os pontos de conexão durante vibrações cíclicas, reduzindo o carregamento transmitido ao terminal do bonde. Simultaneamente, a forma construtiva trançada da cordoalha aumenta a capacidade de acomodar deslocamentos e absorver pequenas deformações sem concentrar tensões em um único ponto.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A flexibilidade também traz importante ganho do ponto de vista de fadiga. Enquanto cabos laterais mais rígidos transfiram parte significativa da vibração diretamente para a região terminal, a cordoalha tende a se comportar como elemento dissipativo, distribuindo deformações ao longo do comprimento útil. Em linguagem de confiabilidade mecânica, isso reduz a severidade da concentração de tensões no elo final do sistema.

Ganhos esperados de confiabilidade e manutenção

Sob a perspectiva operacional, a principal consequência esperada da adoção da cordoalha é a redução da frequência de quebras de terminal, especialmente nos circuitos com maior reincidência e nos trechos mais críticos da Linha 11. A diminuição do número de falhas tende a gerar reflexos sobre diversos indicadores: redução de atendimentos emergenciais, aumento da disponibilidade dos circuitos de via, menor consumo de sobressalentes e menor exposição das equipes a intervenções não programadas em ambiente operacional. Essa linha de benefício está claramente alinhada aos objetivos institucionais da CPTM.

Do ponto de vista econômico, a comparação entre os itens de reposição citados no relatório é expressiva. A cordoalha de referência, na última aquisição citada, custava R\$ 172,00, enquanto o cabo lateral de bonde tinha valor de R\$ 2.920,00. Ainda que a equivalência funcional demande duas cordoalhas por ligação e que a avaliação final dependa do arranjo completo e da vida útil efetiva em campo, a diferença de ordem de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

grandeza sugere oportunidade concreta de racionalização de custos de manutenção caso a performance em serviço seja comprovada ao longo do tempo.

Além disso, a redução de massa do conjunto facilita manuseio, logística de campo e montagem, ampliando a ergonomia da intervenção. Para uma operação de manutenção em via, toda simplificação física do componente tende a contribuir para menor tempo de reparo, menor esforço operacional e menor risco de instalação inadequada.

Reposicionamento do ativo versus mitigação por flexibilidade

Há a recomendação de, quando possível, se propicie o reposicionamento dos bondes de impedância para fora da condição entre trilhos. Essa recomendação é tecnicamente consistente, pois atua na origem da exposição vibratória. No entanto, nem sempre há viabilidade geométrica, funcional, econômica ou de janela operacional para reposicionar todos os ativos críticos. Nesse cenário, a substituição dos cabos por cordoalhas assume papel estratégico por permitir mitigação local sem exigir reconfiguração completa do arranjo da via.

Assim, a interpretação mais adequada não é tratar reposicionamento dos bondes de impedância e cordoalha de cobre estanhado como alternativas excludentes, mas como medidas em camadas. O reposicionamento, quando possível, reduz a severidade do ambiente. A cordoalha, por sua vez, torna o conjunto mais resiliente nas situações em que o ambiente crítico permanece. Já a melhoria de fixação continua relevante como



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

medida complementar, desde que não seja encarada isoladamente como resposta definitiva.

Limitações e necessidade de validação em campo

Embora a análise técnica seja consistente e a proposta apresente forte plausibilidade mecânica, os próprios materiais de apoio registram a necessidade de comprovação em campo e de observação quanto à suscetibilidade a vandalismo.

Embora esses itens ainda não estejam quantificados, eles decorrem diretamente da lógica de implantação segura da solução proposta além do seu embasamento científico.

Enriquecimento de Aprendizado

A principal contribuição deste estudo está em demonstrar que o fenômeno de quebra de terminal em bondes de impedância não deve ser analisado apenas sob a ótica elétrica ou apenas sob a ótica de fixação mecânica. Trata-se de um problema **eletromecânico de interface com a infraestrutura**, no qual a confiabilidade do ativo depende da forma como ele participa do comportamento dinâmico da via. Os dados analisados mostram que, na prática, o terminal rompe porque o conjunto em que ele está inserido deixa de dissipar adequadamente a energia vibratória incidente.

Esse entendimento também tem valor metodológico para a engenharia metroferroviária. Em ambientes complexos, modos de falha recorrentes frequentemente são combatidos com substituição de componente ou reforço pontual do ponto avariado. No caso em estudo, porém, a evidência mostrou que trocar terminais



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ou reforçar apenas a fixação tenderia a manter o mesmo padrão de reincidência se a condição vibratória do conjunto não fosse abordada. A lição aprendida é que o escopo de análise precisa incluir o sistema físico completo e não apenas o componente que rompe.

Também merece destaque o uso combinado de dados históricos e observação de campo. O Pareto inicial revelou a relevância estatística da quebra de terminal; a análise por linha identificou a Linha 11 como foco prioritário; o mapeamento espacial isolou o trecho da Cabine de Rotas; a reincidência por circuito demonstrou persistência local; e a inspeção da via forneceu indícios materiais compatíveis com vibração anormal. Essa construção progressiva da evidência é um ponto forte deste trabalho, porque mostra maturidade de engenharia aplicada e capacidade de transformar eventos de manutenção em decisão técnica fundamentada.

Outro ponto importante estudo é a relação entre custo X confiabilidade. Nem toda solução de engenharia mais barata é necessariamente melhor, mas neste caso há indício de que a alternativa mais flexível pode ser simultaneamente **mais eficaz e mais econômica**. Isso é raro e relevante. Se os testes de campo confirmarem redução consistente da reincidência, o retorno institucional da proposta será duplo: ganho operacional e ganho econômico.

Por fim, a solução com cordoalha revela um princípio clássico de engenharia de manutenção: em vez de reforçar indefinidamente o ponto que quebra, pode ser mais inteligente **redistribuir os esforços do sistema** para que o componente crítico deixe de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

receber carga acima da sua capacidade real de resistência. Essa mudança de paradigma – de reparo reativo para reprojeto funcional da ligação – converte um problema de manutenção em oportunidade de inovação aplicada.

CONCLUSÕES

A análise realizada demonstra de forma consistente que a quebra de terminais em bondes de impedância instalados entre-trilhos constitui um problema relevante de confiabilidade no sistema metroferroviário estudado. Entre janeiro de 2020 e maio de 2025, esse modo de falha respondeu por 39 ocorrências, com crescimento ao longo dos anos e forte concentração na Linha 11, particularmente no trecho da Cabine de Rotas, onde se registraram 33 eventos, equivalentes a 84,6% do total.

O diagnóstico mostrou que a criticidade observada não é explicada apenas pela existência de um grande parque de equipamentos Fresinbra, mas sobretudo pela combinação entre instalação entre trilhos, exposição elevada à vibração da via, condições locais da superestrutura e características mecânicas do conjunto de ligação elétrica. A interpretação do sistema como um arranjo massa-mola permitiu compreender por que o terminal atua como elo fraco, rompendo por fadiga ou excesso de solicitação dinâmica.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Os resultados da ação corretiva anterior, baseada no reforço da fixação por meio de tirefão otimizado, indicaram que a melhoria de fixação isoladamente não resolve o problema. A reincidência observada em 8 dos 18 bondes tratados mostrou que a medida não ataca a variável dominante do fenômeno, que está na transmissão vibratória ao terminal.

Nesse contexto, a substituição dos cabos laterais convencionais por cordoalhas de cobre estanhado se apresenta como solução tecnicamente mais aderente à causa raiz identificada. A menor massa do conjunto, associada à maior flexibilidade e melhor acomodação de tensões, tende a reduzir a transferência de esforços ao terminal, aumentando a resistência à fadiga e a vida útil do sistema. Adicionalmente, a solução apresenta potencial de redução de custos, simplificação da manutenção e maior racionalidade operacional.

Conclui-se, portanto, que o aumento da confiabilidade dos bondes de impedância passa por uma abordagem integrada, composta por:

- priorização dos trechos críticos, especialmente na Linha 11;
- mitigação das condições anormais da via permanente;
- adoção de ligação elétrica mais flexível por meio de cordoalhas;
- manutenção da melhoria de fixação como medida complementar;
- e validação estruturada dos resultados em campo.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Mais do que uma ação corretiva pontual, trata-se de uma oportunidade de evolução de engenharia aplicada, com potencial de replicação em outros ambientes metroferroviários que apresentem fenômenos semelhantes.