

3º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

INICIATIVAS PARA MELHORIA NO CONTATO RODA-TRILHO NA VLI

AUTORES

INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios do setor metroferroviário é a redução de custos em manutenção e operação. Garantir uma boa dinâmica trem-via, principalmente em trechos acidentados (com raios de curva apertados e/ou rampas muito inclinadas), contribui para o aumento da vida útil dos componentes de via permanente e material rodante, além de reduzir o consumo específico de combustível do trem.

A VLI (Valor da Logística Integrada) é uma ferrovia cujas características geométricas de sua malha influenciam bastante na performance do trem. A predominância de curvas, aliada à falta de rigidez nos truques adotados na maior parte da frota, tem contribuído para a intensificação do desgaste de trilhos e rodas. Além disso, os trens muitas vezes são operados

em velocidade inferior àquela projetada para a via, tornando o dimensionamento das superelevações de curvas um desafio.

Para mapear as causas efetivas e conter o avanço destes efeitos, um grupo multidisciplinar foi estabelecido. Especialistas das áreas de Engenharia Ferroviária VLI (via permanente, material rodante e operação) destacaram os principais itens influentes no contato roda-trilho para aprofundamento do estudo. Este artigo aborda algumas das iniciativas em estudo para melhoria do contato roda-trilho nas operações da VLI, como o desenvolvimento de truques de alta performance, adequação da superelevação em curvas, gestão de atrito e esmerilhamento de trilhos.

## **DIAGNÓSTICO**

A demanda por maiores velocidades e maior capacidade de carga traz novos problemas de desgaste e estabilidade e tem forçado operadores ferroviários e fornecedores de equipamentos a endereçarem estes problemas de uma forma mais sistemática e fundamental (Garg e Dukkipati, 1984).

E com a VLI não é diferente. Desde 2012 foi iniciado um plano de investimentos para renovação da frota de materiais rodantes e da via permanente, de forma a capacitar os corredores ferroviários para volumes de transporte crescentes. Com estas recentes transformações de aumento de carga por eixo e do fluxo e tamanho dos trens em alguns corredores ferroviários, compreender a dinâmica ferroviária é fundamental para propiciar o controle do desgaste da roda/trilho e a confiabilidade e estabilidade dos veículos ferroviários.

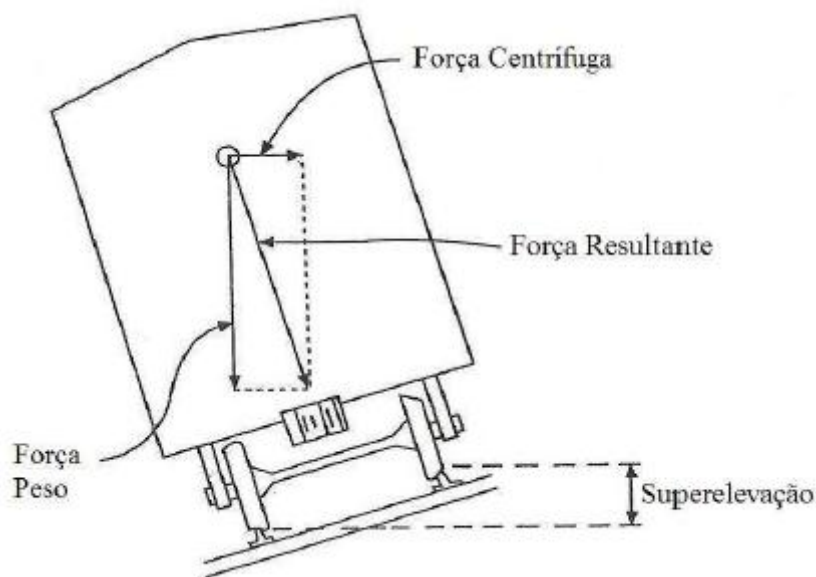
Desta forma, um grupo multidisciplinar foi criado com o intuito de aprofundar conhecimentos na área de dinâmica trem/via, reunindo as iniciativas em desenvolvimento e mapeando novas oportunidades de melhoria no contato roda-trilho para implantação na VLI.

As iniciativas para melhoria de interação trem/via e na interface roda/trilho foram divididas em 5 grandes grupos:

- Trilho, englobando a gestão de atrito, o efeito do esmerilhamento, a gestão da superelevação e o trilho longo soldado;
- Truque, abrangendo o *retrofit*, projetos desenvolvidos especialmente para a VLI e utilização de novos componentes;
- Roda, com a avaliação da qualidade metalúrgica, do estudo do perfil e das definições de reperfilamento mais adequado à VLI;
- Monitoramento de ativos, com a aplicação de equipamentos como Waysides, ultrassom, inspeção de geometria de via e *Ground Penetrating Radar (GPR)*;
- Operação, com a avaliação de modelos de trens e condução ideal para os trechos da VLI.

Um dos primeiros trabalhos iniciados foi em relação à superelevação ideal.

A superelevação é um conceito físico utilizado para fornecer o necessário equilíbrio de esforços na circulação de veículo em curvas, sem que ele saia de sua trajetória devido ao efeito da força centrífuga agindo sobre o veículo em movimento. (Pastrello, 2011). De modo simplificado, é possível explicá-la como sendo o aumento de altura da fila externa de trilhos em relação à fila interna, realizado em trechos em curva, para compensar este efeito sobre o veículo (Magalhães, 2011).



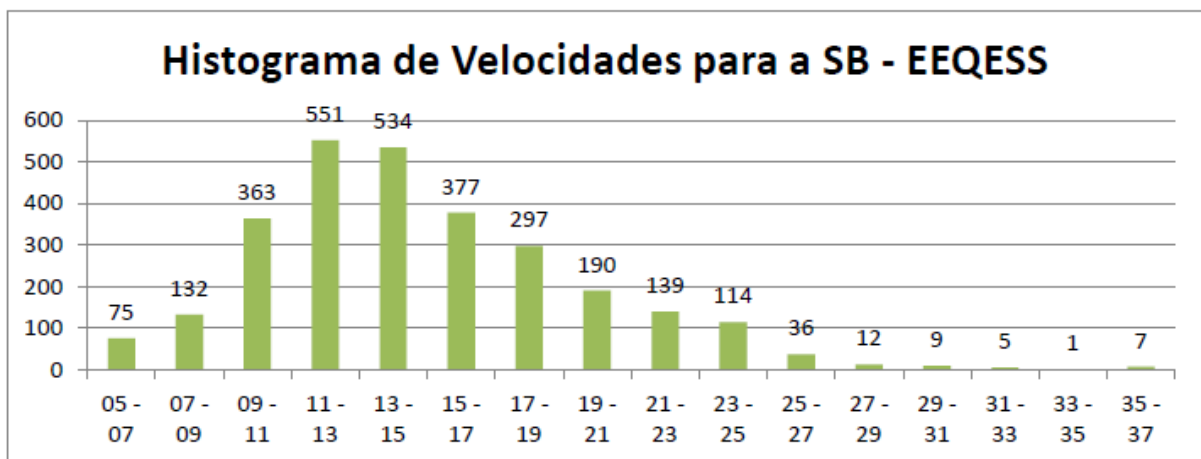
**Figura 1 – Superelevação e as forças atuantes (Viganico, 2010 apud Dukkipati, 2000)**

Desta forma, o correto dimensionamento da superelevação é importante, principalmente porque não apenas a falta, mas também o excesso de superelevação pode ser danoso à circulação de trens numa ferrovia. Aplicando-se um valor menor que o necessário para a velocidade de circulação dos veículos pode-se causar o descarrilamento ou tombamento para o lado externo da curva, enquanto com um valor excessivo para esta, pode-se incorrer em tombamentos para o lado interno da curva neste trecho, devido ao maior valor da componente da força peso do trem, em relação à força centrípeta. E, nesse último caso, aumenta também o risco do descarrilamento de trens lentos em curva muito superelevada. Além destes dois aspectos diretamente relacionados à segurança operacional, deve-se considerar também as outras vantagens advindas de um criterioso dimensionamento da superelevação, como o rolamento suave em curvas, diminuindo os custos de manutenção advindos de desgastes dos componentes da via permanente, como trilhos e materiais

metálicos, de componentes de locomotivas e vagões, e a redução no consumo de combustível (Pastrello, 2011).

Estudos conduzidos por consultoria externa endossam que todas as forças atuantes na via são diminuídas quando os trens são operados próximo da velocidade de balanço da via. Contudo, o que se percebe na prática é que, de maneira geral, os trens da VLI estão circulando muito abaixo desta velocidade de balanço.

Um levantamento das velocidades de circulação de trens de carga em diversos trechos da VLI foi realizado e foi possível comprovar que há grandes diferenças entre a velocidade de projeto e as velocidades efetivamente praticadas. Um exemplo das velocidades praticadas pelos trens de carga no trecho Santanense (EEQ) e Padre Eustáquio (ESS) é apresentado abaixo, onde se percebe que as velocidades praticadas ficaram bem inferiores à velocidade de projeto, que é de 40 km/h.



**Figura 2 – Exemplo de histograma com distribuição de velocidades praticadas no trecho entre EEQ-ESS**

Este comportamento se repetiu em diversos trechos VLI e as causas são diversas. Existem casos de problema de concepção dos modelos de trens, que são dimensionados para a máxima capacidade tratora das locomotivas na rampa crítica e muitas vezes não conseguem atingir a velocidade de projeto, de manutenção de via, que por ocorrência de restrições pontuais impossibilitam a utilização de rampas de impulso pelos trens, ou ainda de projeto de via permanente, cujo dimensionamento prevê uma velocidade incompatível com a prática. Diante destes resultados, foi possível concluir ser necessária a revisão da metodologia do cálculo de superelevação adotada na VLI para obtenção de melhor dinâmica trem-via.

O surgimento de defeitos superficiais observados no boleto de trilhos também se tornou uma questão fundamental de estudo pela VLI.

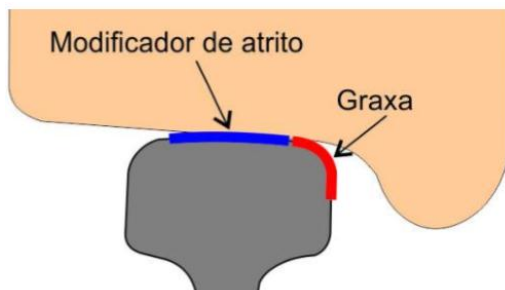
A presença destes defeitos no boleto trilho, de maneira geral, pode acarretar em diminuição da vida útil do trilho, das fixações e do lastro, aumento no consumo de combustível e na manutenção das locomotivas, diminuição da vida útil do sistema de freios das locomotivas/vagões, aumento nos danos das cargas transportadas pelos vagões, acelerado desgaste nos componentes dos truques e aumento de ruídos e vibrações (Zarembski, 2005).

Para a remoção destes defeitos superficiais realiza-se um processo denominado esmerilhamento de trilhos, o qual exige precisão nos cálculos quanto à quantidade de metal a ser removido. Segundo Zarembski (2005), se por um lado uma insuficiente remoção resulta na continuidade da propagação dos defeitos e redução da vida em fadiga dos trilhos, por outro lado uma excessiva remoção de metal potencializa o desperdício de recursos financeiros em razão de um prematuro reperfilamento do boleto.

Viana e Schimtzter (2015) relataram o trabalho realizado em conjunto para a definição dos perfis do boleto dos trilhos objetivando o contato ideal entre roda e trilho. Na primeira fase do projeto foi feita a avaliação das condições das rodas e dos trilhos e a definição dos perfis e padrões de esmerilhamento recomendados. Na segunda fase, foram feitos testes e implantação dos gabaritos e padrões elaborados especialmente para as condições de operações ferroviárias da VLI. A terceira fase é a que está em andamento em 2016 e refere-se à verificação do desempenho do esmerilhamento.

Outra frente de trabalho em andamento é a análise de implantação da gestão do atrito. Gerenciamento do atrito é o processo de controlar o coeficiente de atrito existente no contato roda/trilho em valores mais apropriados para a interação veículo/via, resultando em melhores índices de desgaste, redução de forças laterais em curvas e economia de combustível (Sroba, Oldknow, Dashko e Roney, 2005).

O controle do atrito deve ocorrer em duas partes distintas da interface roda-trilho através da lubrificação da face de bitola do trilho e flange das rodas e o controle do atrito no topo do trilho e na bandagem das rodas. A lubrificação face de bitola/flange das rodas requer um lubrificante de alta qualidade, sólido ou líquido; enquanto o controle do atrito no topo do trilho requer modificadores de atrito, também sólidos ou líquidos. A diferença entre lubrificante e modificador de atrito é conceitual, enquanto o lubrificante reduz o coeficiente de atrito a níveis mínimos; o modificador de atrito controla o atrito a níveis considerados ideais, que não interferem na tração e frenagem dos trens (Carmo, Vidon, Eadie, Oldknow, e Lopes, 2011). A seguir, ilustração das duas zonas de atrito no trilho, com os respectivos sistemas de gerenciamento de atrito recomendado:



**Figura 3 – Zonas de atrito no trilho com os respectivos sistemas de gerenciamento de atrito recomendado**

A tabela a seguir resume diversos benefícios com a implantação de *Top of Rail* (TOR) e lubrificação lateral de trilho com unidades fixas apontados por diversos estudos bibliográficos (Roney, Eadie, Oldknow, Sroba, Caldwell e Santoro, Maglalang, Fetterman e Daughtry, Carmo, Vidon, Eadie, Oldknow, Lopes, 2011, Jorge, Rodrigues, Silva1, Vidon, Vidon, Sroba e Caldwell) e IHHA, 2001).

**Tabela 1 - Ganhos relatados na literatura com a implantação da gestão de atrito**

Ganhos relatados na literatura
Redução da força lateral entre 11% - 57%
Redução no desgaste de trilho entre 20% e 80%
Redução do desgaste de rodas entre 5% - 15%
Redução no consumo de combustível entre 3% - 65,5%
Redução de serviços de correção de bitola
Redução na quebra das fixações
Redução dos riscos de descarrilamento por "wheel climbing" (mecanismo de subida do friso da roda sobre o trilho)
Aumento de vida útil em dormentes
Aumento no intervalo do esmerilamento de trilhos
Aumento no intervalo de surgimento de RCF (Rolling Contact Fatigue)
Melhoria do desempenho da inscrição dos truques nas curvas



Como os investimentos para implantação do gerenciamento do atrito efetiva são significativamente altos, faz-se necessário um estudo detalhado para sinalizar a viabilidade de implantação na VLI.

Os veículos ferroviários normalmente são constituídos de um corpo, o qual é suportado por truques em cada extremidade. O truque é a estrutura que contém duas ou mais montagens de roda-eixo (rodeiros). A suspensão suporta o corpo do veículo, fornece orientação direcional, filtra os efeitos das imperfeições da geometria da via e fornece estabilidade dinâmica. O truque, portanto, é de importância fundamental nos estudos dinâmicos de veículos ferroviários (Viganico, 2010) e como tal é um dos itens tratados pelo grupo da VLI.

Tournay (2015) apresenta em seu trabalho novos conceitos e características que o truque deverá ter para obter melhor inscrição em curvas, reduzindo o ataque das rodas aos trilhos, resultando em menor desgastes. Mostra que para que o truque tenha uma melhor inscrição em curvas, deverá permitir um grau de liberdade ao rodeiro.

Em busca dos benefícios do truque mais adequado às operações VLI, estudos foram iniciados, tanto para a avaliação de truques de alta performance, quanto para *retrofit* dos componentes atuais.

## **ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Os resultados dos trabalhos em andamento estão agrupados por grandes assuntos e são discutidos nas seções subsequentes.

### **1. Superelevação**

Se a superelevação tem por finalidade anular o efeito da força centrífuga em curva, então a superelevação teórica pode ser calculada através da análise do equilíbrio de forças atuantes no veículo na passagem por curvas.

Magalhães (2011) explica que, como a superelevação teórica depende da velocidade do trem e esta, em geral, sofre grandes alterações durante a operação, não é recomendável a aplicação direta do valor de equilíbrio calculado de superelevação para um determinado trecho. Por isso, cada ferrovia adota uma superelevação prática a ser inserida em sua via.

Para o caso da VLI, percebe-se que a superelevação prática tem sido adotada (que equivale à 2/3 da superlevação teórica) ainda não está adequada à realidade operacional, que tem trens de carga geral percorrendo rampas no sentido ascendente em velocidades mais baixas e que as velocidades no sentido descendente.

Devido a isso, estudos foram desenvolvidos e chegou-se à conclusão que os métodos atualmente disponíveis, tanto os empíricos, quanto os racionais, precisam de adaptações para o caso VLI.

A metodologia proposta é uma combinação de um método empírico, um racional e uma adaptação da superelevação teórica.

- Critério empírico: Adota velocidade de cálculo como 2/3 da velocidade máxima, o que resulta em superelevação prática como 2/3 da teórica;
- Critério racional: Adota o critério de segurança, que tem como objetivo garantir a estabilidade do veículo em curva, impedindo seu tombamento para o lado externo da

curva. A estabilidade é garantida através da aplicação de um coeficiente de segurança, que compensará a força centrífuga não equilibrada (Brina, 1987).

$$s_p = \frac{B.V^2}{127.R} - \frac{B}{H.n} \left( \frac{B}{2} - d \right)$$

Onde:

H: altura do centro de gravidade (varia entre 1500mm para locomotivas até 1800 mm para vagões carregados da bitola estreita);

B: bitola da via mais largura do boleto;

n: coeficiente de segurança (costuma ser fixado entre 3 e 5);

d: deslocamento real do centro de gravidade em curvas (pode ser considerado aproximadamente igual a 100 mm.

- Critério adaptado: Adota a velocidade média praticada pelos trens carregados ao invés da velocidade de projeto.

$$St = (B.V^2)/(127 .R)$$

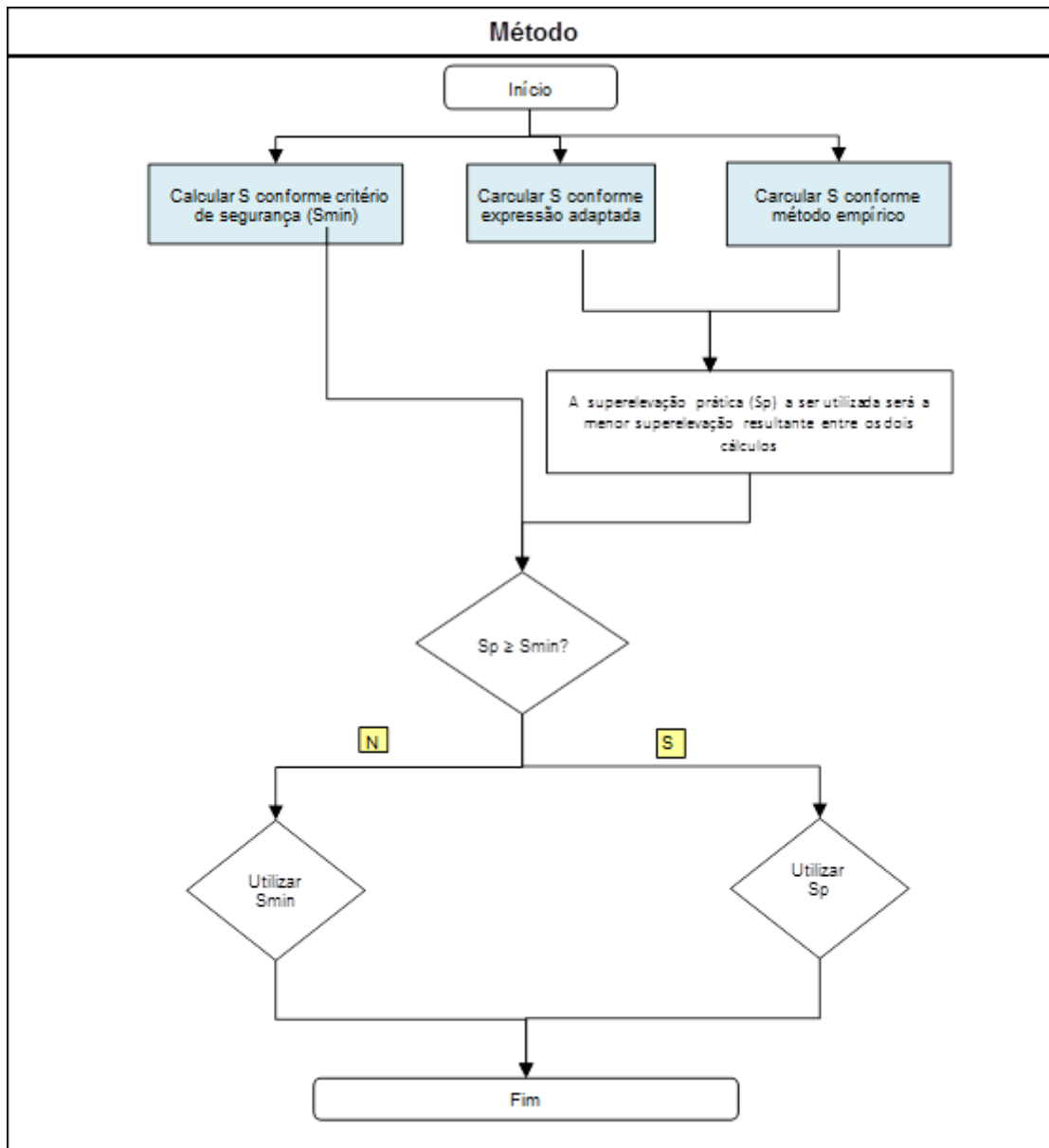
St: superelevação teórica em mm;

B: bitola da via tomada de eixo a eixo do boleto de trilho em mm;

V: Velocidade media praticada pelos trens carregados em KM/h;

R: Raio da curva em m.

Pela comparação dos resultados obtidos nos três métodos são feitas recomendações de superelevação, conforme fluxograma a seguir.



**Figura 4 – Fluxograma do método de cálculo de superelevação**

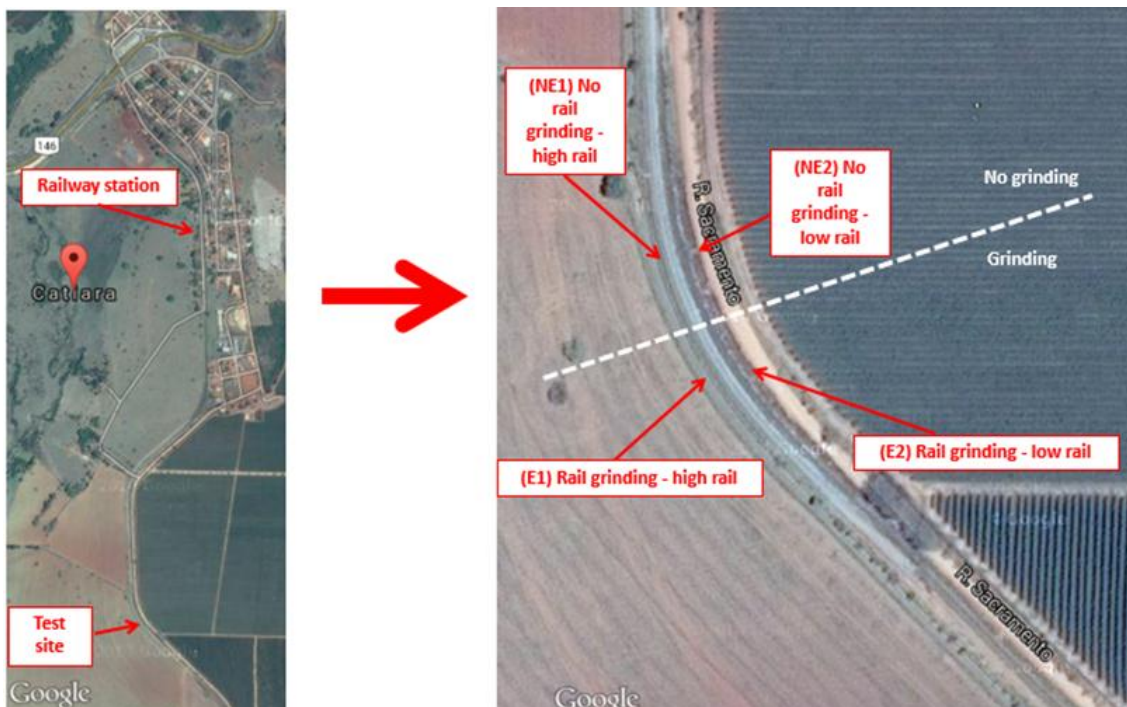
## 2. Esmerilhamento de Trilhos

Para a comprovação dos benefícios do esmerilhamento foi montado um local de teste, que com o auxílio do equipamento de medição de perfil (*Miniprof rail*) monitora a evolução do desgaste de trilhos de curvas selecionadas. Com o teste, que tem previsão de conclusão em

dezembro de 2016, espera-se verificar qual a porcentagem de economia de trilhos esmerilhados versus não esmerilhados em relação ao desgaste.

Uma das curvas monitoradas está ilustrada na figura abaixo e possui as seguintes características:

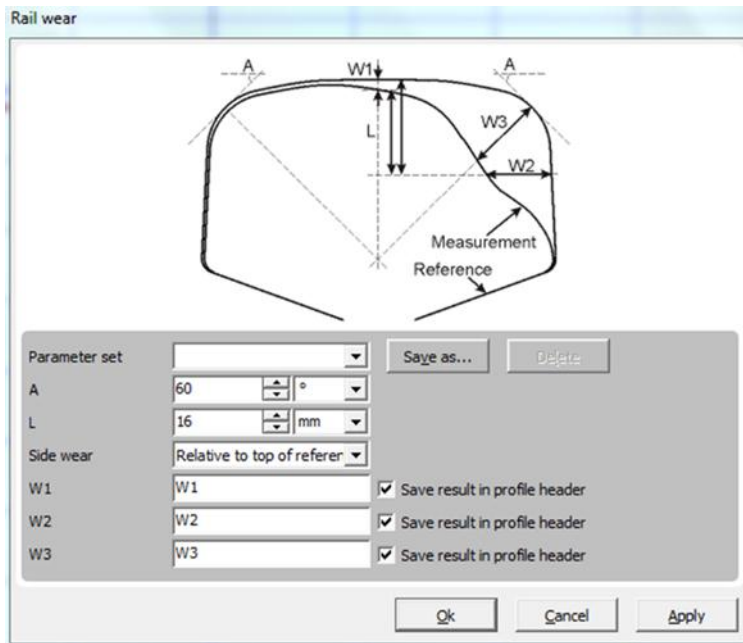
- Trilho perfil TR45 kg/m;
- Classe do aço do trilho: AREMA Standard – 310 HB (dureza Brinell);
- Raio de curvatura = 280 m;
- 12 MTBT (milhões de toneladas brutas trafegadas) anuais.



**Figura 5 – Local de testes de esmerilhamento**

Periodicamente, o equipamento registra parâmetros do perfil do boleto do trilho em quatro pontos da curva, sendo dois pontos no lado com esmerilhamento (E1 - trilho externo, E2 -

trilho interno) e dois no lado sem esmerilhamento (NE1 - trilho externo, NE2 - trilho interno). Os parâmetros do perfil do boleto do trilho medidos são os desgastes vertical (w1), lateral (w2) e no canto de bitola (w3), os quais são convertidos em desgaste (mm) versus MTBT.



**Figura 6 – Parâmetros medidos pelo instrumento de medição de desgaste de trilhos miniprof.**

Resultados preliminares mostram que a vida útil dos trilhos esmerilhados pode ser aumentada em mais de 20% em relação aos trilhos não esmerilhados. Ao final do projeto a expectativa é de uma economia mínima na ordem de 30% dos trilhos esmerilhados.

### **3. Gestão do Atrito**

Foi realizada a análise de viabilidade considerando as seguintes premissas:

- Redução de desgaste do trilho interno em 25% e do externo em 70%;
- Redução de serviços de correção de bitola em 30% ;
- Aumento da vida útil de dormentes em tangentes em 5% e em curvas em 10%.

Para a redução do desgaste de trilho, usou-se como base o modelo apresentado pelo Kalousek para a MRS. Foi considerado que os trilhos instalados atualmente estão divididos em 4 grupos com vida útil restante distinta conforme a seguir:

- 25% dos trilhos com 100% da vida útil;
- 25% com 75% da vida útil;
- 25% com 50% da vida útil;
- 25% com 25% da vida útil.

Em relação a vida útil do trilho foi levado em consideração o raio de curvatura abrangente no trecho em análise de acordo com modelo apresentado por Kalousek para a MRS, dessa forma, a vida útil dos trilhos ficou conforme abaixo:

- Centro Leste: 166,67 MTBT
- Centro Sudeste: 277,78 MTBT
- Centro Norte: 444,44 MTBT

Em relação ao volume anual, foi calculado o volume médio anual trafegado por corredor para inserir nas análises, ficando da seguinte forma:

- Centro Leste: 12 MTBT ano;
- Centro Sudeste: 21 MTBT ano;
- Centro Norte: 21 MTBT ano;

De acordo com os resultados das análises de viabilidades, todos os cenários apresentaram VPL positivo, o que confirma os benefícios da implantação do gerenciamento do atrito efetivo.

Para o ano de 2016, a VLI prevê a implantação em um dos cenários do corredor Centro Leste para medições e monitoramento e a partir daí, ampliar a gestão de atrito para os outros locais.

#### **4. Truque**

Em parceria com o fornecedor, foram estudadas as influências da adoção de truque de alta performance em novos vagões. Comparativamente aos truques que a VLI possui na atualidade, os de alta performance prometem melhorar o comportamento dinâmico em curvas, uma vez que permitem uma melhor inscrição dos rodeiros e reduzem o ataque da roda ao trilho. Outros benefícios atribuídos a estes novos truques são o aumento da segurança (com redução da relação entre força lateral e vertical), a extensão da vida útil da roda e do trilho da ordem de 3 a 4 vezes (se comparada à condição atual) e a redução do consumo de combustível da ordem de 11% (estimativa obtida via simulação de operação de trens em corredor VLI específico).

Para comprovar os resultados e benefícios encontrados nos estudos e simulações dinâmicas virtuais um vagão protótipo foi desenvolvido para os testes em campo. O vagão foi instrumentado para capturar as informações de dinâmica e uma viagem em ciclo fechado, entre carregamento e descarga, deve ocorrer nos próximos meses.

Como alternativa mais econômica, também está sendo estudada a possibilidade de *retrofit* de truques existentes, isto é, de reforma de alguns componentes e modificações dimensionais dos truques atuais de forma a proporcionar-lhes características de truques de alta performance.

## **CONCLUSÕES**



Este artigo apresentou algumas das iniciativas que a VLI está desenvolvendo para a otimização do contato roda/trilho e da dinâmica trem/via com o intuito de colher resultados sustentáveis para a sua atividade ferroviária. Muitas delas ainda estão em estágio inicial, todavia, os resultados preliminares já demonstram o grande potencial de mudança de patamar que serão refletidas nos custos de manutenção e operação de trens. Por isso acreditamos que a divulgação de estudos como estes contribuem para a comunidade ferroviária brasileira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brina, H. L. **Estradas de ferro: Via Permanente**. 2ª Edição. Editora UFMG, Belo Horizonte, 1987. v. 1.

CARMO, R. VIDON, F. EADIE, D. OLDKNOW, K. LOPES, L. **O Gerenciamento do Atrito na MRS Logística**. Artigo para o III Encontro de Ferrovias. 2011.

Dukkipati, R.V. **Vehicle Dynamics**, CRC, Boca Rat, Florida, 2000.

Garg, V. K. e Dukkipati, R. V. **Dynamics of Railway Vehicle Systems**, Academic Press, Nova Iorque, 1984.

IHHA Best Practice. **Wheel and Rail Interface Issues**. 2001.

JORGE, C. RODRIGUES, R. SILVA, F. VIDON JR., W. VIDON, F. SROBA, P. e CALDWELL, R. **Otimizando a Lubrificação Gauge-Face de Trilhos e Introduzindo o Gerenciamento do Atrito TOR na MRS**. Encontro de Ferrovias.

Magalhães, P.C.B. **Apostila de Prevenção e Investigação do Descarrilamento de Trens**. Pós-graduação em Engenharia Ferroviária: PUC Minas. Belo Horizonte, 2011.

MAGLALANG, L. FETTERMAN, P. DAUGHTRY, L. **Reducing Stress on a Low Traffic Density Highly Curved System using hi-rail TOR Friction Control.**

Pastrello, B. **Superelevação: Análise de métodos de cálculo e otimização de valores para a Rota do Grão da FCA**, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Monografia (Pós-graduação), Belo Horizonte, 2011.

RONEY, M. EADIE, D. T. OLDKNOW, K. SROBA, P. CALDWELL, R. e SANTORO, M. **Gerenciamento Total do Atrito na Canadian Pacific.**

Sroba, P. Oldknow, K. Dashko, R. Roney, M. **Canadian Pacific Railway 100% Effective Friction Management Strategy.** International Heavy Haul Conference, Rio de Janeiro, 2005.

Tournay, H. **Benefits of Improved Truck Design.** 20th Annual AAR Research, 2015.

Viana, T., Schimtzter, G. **Estudo de Contato roda-trilho para esmerilhamento de trilhos na VLI.** 21ª Semana de Tecnologia Metroviária, São Paulo, 2015.

Viganico, C.E.H. **Avaliação dinâmica de veículos ferroviários através de um sistema multicorpos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação (Mestrado), Porto Alegre, 2010.

Zarembski, A.M. **The art and science of rail grinding.** Simmons-Boardman Books, Omaha, 2005.