

# AUMENTO DE CARGA POR EIXO: RESULTADOS PRÁTICOS DA DINÂMICA VIA X VAGÃO NA MRS LOGÍSTICA

**Paulo Gonzaga Ferreira**  
Instituto Militar de Engenharia

## RESUMO

Este artigo objetiva apresentar o processo de aumento de carga por eixo através de novo modelo de vagão desenvolvido para a capacidade de 36 toneladas por eixo em adição ao modelo corrente operacional de 32,5 toneladas por eixo no fluxo de minério de ferro na operadora ferroviária brasileira MRS Logística S.A. Os estudos desenvolvidos para viabilizar o aumento de carga por eixo relatados nesse trabalho foram direcionados para a análise das respostas dinâmicas na interação vagão x via com foco nas questões operacionais e de manutenção que esse incremento de carga por eixo pode provocar no sistema ferroviário em questão. Análises dinâmicas foram desenvolvidas a partir de dois aspectos: análises preliminares em softwares específicos de simulação multi-corpos e na sequência testes práticos através de medições reais na via e nos vagões. Foram utilizadas instrumentações na via na primeira fase do projeto, e na sequência foram instrumentados vagões. Ambos objetivando a análise de segurança ferroviária para o novo modelo de trem proposto na MRS Logística.

## ABSTRACT

This paper aims to present the process of increasing axle load through new wagon model developed with capacity of 36 tonnes per axle in addition to operational models of 32,5 tonnes per axle at the iron ore transport in a Brazilian heavy-haul railway. MRS Logística S.A. operates a 1700 km railroad in southeastern Brazil. The studies were directed to the evaluation of the responses: in the dynamic interaction of track and wagon, in the operational and maintenance issues that this additional load will cause to the whole railway system. Dynamic evaluation was developed by two aspects: the preliminary analysis made by using multibody simulation software and later, practical tests by measuring on track and wagon. Firstly, a measuring device installed on the track of forces acting on the superstructure and the second being measured on the wagon from the instrumentation of components. Both aimed to evaluate the safety of this new model of train.

## 1. INTRODUÇÃO

A MRS Logística é uma operadora ferroviária privada que opera uma das mais importantes ferrovias no Brasil. Sua malha é localizada na região sudeste do país abrangendo os três principais estados em termos de geração de bens de economia no país: São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro.

Os principais produtos transportados na ferrovia dessa operadora são: minério de ferro, manufaturas em aço, cimento, carvão metalúrgico e contêineres, sendo que 80% do volume total transportado é o minério de ferro. O volume anual transportado da MRS Logística quadruplicou desde os 42 MTBT (milhões de toneladas brutas) em 1996 para alcançar em 2014 o volume de 160 MTBT com expectativas para 2020 de superar 190 MTBT. Para suportar este incremento significativo de volume em face das restrições de capacidade do sistema, são necessários estudos para desenvolvimento de melhoria de produtividade, sendo umas dessas iniciativas o atual projeto de aumento de carga por eixo de seus vagões, habilitando sua operação de 32,5 toneladas por eixo para o alvo de 36 toneladas.

## 2. DESENVOLVIMENTO

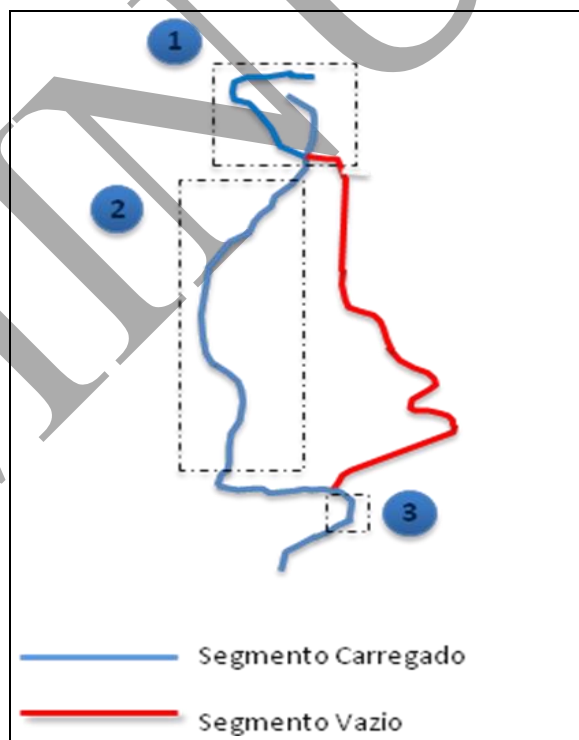
### 2.1. Caracterização da Malha e Operação Ferroviárias

A malha da MRS é constituída de bitola larga (1.600 mm) e consiste de três rotas principais com diferentes características geométricas. A maior parcela de trens destinados ao transporte *Heavy Haul* da MRS consiste de duas locomotivas de 4.400 HP tracionando 134 vagões gôndolas de minério de ferro (modelo GDT com carga máxima de 130 toneladas, resultando em 32,5 toneladas por eixo). Em regiões com greides ascendentes acentuados, entre 2 e 3

locomotivas são adicionadas para complementar a tração.

O fluxo padrão de transporte de minério de ferro na MRS inicia-se no carregamento nas minas na região central do estado de Minas Gerais (item 1 da Figura 1) com destino final na região portuária do Rio de Janeiro. Este fluxo inicia-se basicamente na Ferrovia do Aço (item 2 da Figura 1), transitando pelo corredor do Rio de Janeiro e com fluxo de retorno de vagões vazios na denominada Central do Brasil, hoje conhecida como Linha do Centro. Para o segmento do fluxo carregado destacam-se os extremos em termos de condições de geometria. No primeiro segmento denominado Ferrovia do Aço, a geometria planialtimétrica é suavizada devida aos túneis e viadutos executados possibilitando longas tangentes. Nesse segmento as curvas mínimas apresentam raio de curva horizontal de 900 metros com rampas de 1%. Por ser uma construção relativamente recente (25 anos), essa foi uma ferrovia construída com elevados padrões de drenagem, terraplenagem e materiais de via, possibilitando um corredor de alta eficiência operacional.

Na sequência do fluxo carregado encontra-se o segmento denominado Serra do Mar (item 3 da Figura 1), de construção secular. Esse segmento transpõe a região montanhosa do Rio de Janeiro em 42 quilômetros de linha dupla de restrito gabarito ferroviário. Sua geometria é restrita apresentando curvas de 170 metros com rampas de 2,3% e entrevia mínima de 3,60 metros. Nesse último segmento está concentrado o desafio operacional de operacionalizar de forma segura e eficiente um novo modelo de trem com 2.000 toneladas adicionais ao modelo convencional.



**Figura 1:** Representação Malha Ferroviária MRS

## 2.2. Caracterização de Vagões para Fluxo de Minério de Ferro na MRS

O projeto de aumento de carga por eixo nos vagões da MRS se iniciou em 2010 a partir do projeto e desenvolvimento de vagões com maior capacidade volumétrica em comparação ao modelo corrente. Devido a restrições geométricas de gabaritos de silos de carregamento e viradores de vagões existentes o modelo proposto final para o projeto se diferencia de vagões convencionais para o transporte de minério como observado nas ferrovias *Heavy Haul* do gênero conforme evidenciado na figura 2.

O modelo proposto desenvolvido entre a equipe de engenharia de vagões da MRS e fornecedores nacionais resultou no modelo de capacidade máxima de 160 toneladas, porém devido a restrições de pontes e viradores existentes a capacidade inicial máxima seria de 144 toneladas resultando em 36 por eixo, desta forma foram acrescentados 5 metros cúbicos em relação à capacidade do modelo corrente. Melhorias nos sistemas de truques e engates também foram realizadas para suportar o novo patamar de esforços.

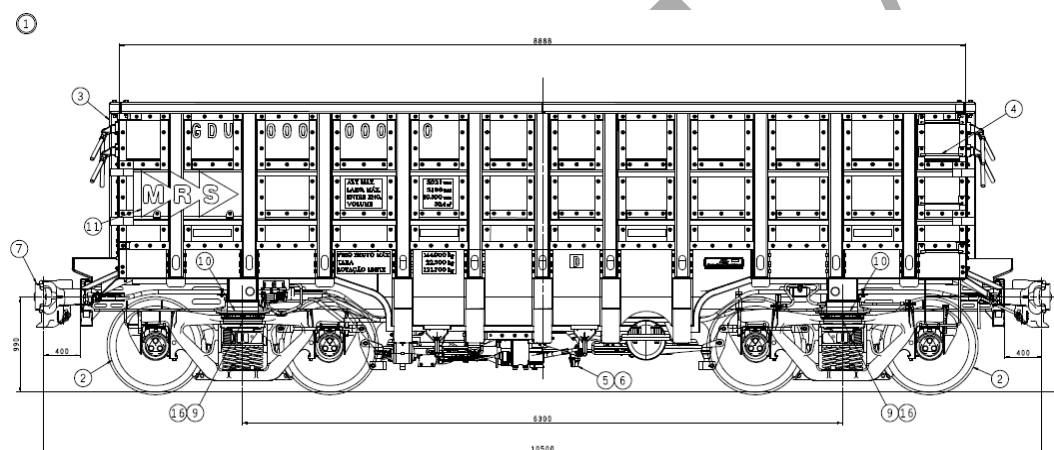


Figura 2: Representação do modelo vagão GDU para a MRS

## 2.2. Desenvolvimento

Para a verificação de segurança operacional do novo modelo de trem e de sua viabilidade técnica, foi requerido esforço mútuo das equipes de Engenharia de Via, Vagões e Operações da MRS Logística. Os estudos foram segmentados em quatro etapas: revisão bibliográfica, definição do plano de instrumentação de via e vagões, simulações e testes monitorados.

### 2.1.1. Revisão Bibliográfica

A dinâmica de trens tem sido constantemente estudada em todas as ferrovias devido a crescentes demandas de eficiência no sistema. Conforme Aronian, Wachs, Jamieson (2013), agrupam-se as causas em dois grupos: dimensionamento de trens e diferenças no perfil de linha. No primeiro destacam-se:

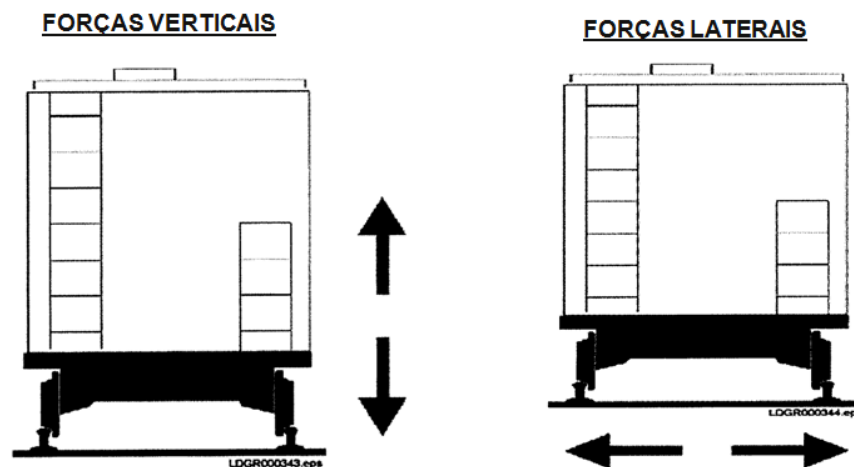
- incremento no comprimento de trens,
- incremento de lotação de trens,
- diferenças entre tipos de vagões (massa, comprimento, tara, etc),
- diferença de tração,
- diferenças na distribuição de tração

No segundo grupo são listadas as variações referentes ao perfil de linha, ressaltam:

- diferenças de greide de linha (ascendente ou descendente),
- combinação de sags,
- combinação de curvas.

Com o entendimento dessas variáveis forma-se o conceito de Dinâmica de Trens, onde de maneira sucinta se refere à compreensão dos movimentos dinâmicos e forças resultantes na condução, na formação do trem de acordo com as combinações de curvas e greides com a influência da interação de veículos em uma composição ferroviária. Desta forma se faz necessário o entendimento da dinâmica de trens para operações seguranças no âmbito ferroviário.

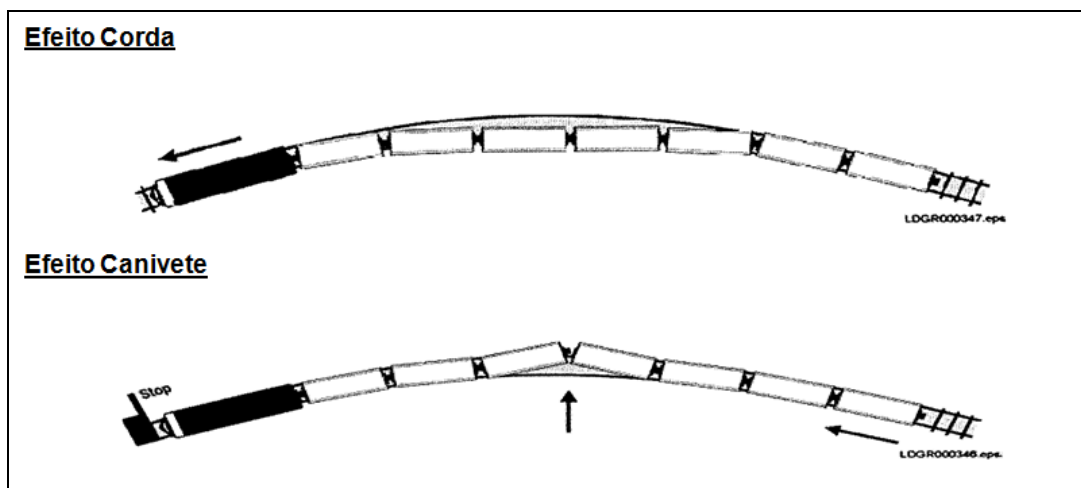
A partir do conceito inicial, as forças atuantes nos trilhos são segmentadas em lateral e vertical conforme apresentado na Figura 3. Para o equilíbrio seguro dessas forças, subentende-se que a força vertical deve ser maior que a força lateral. Forças verticais advêm da massa de vagões e de oscilações da via e forças laterais são resultantes entre o friso da roda e a parte interna dos trilhos provocadas por forças de angulação de engates, e de movimentos do truque durante a inscrição em curvas.



**Figura 3:** Representação das forças atuantes nos trilhos

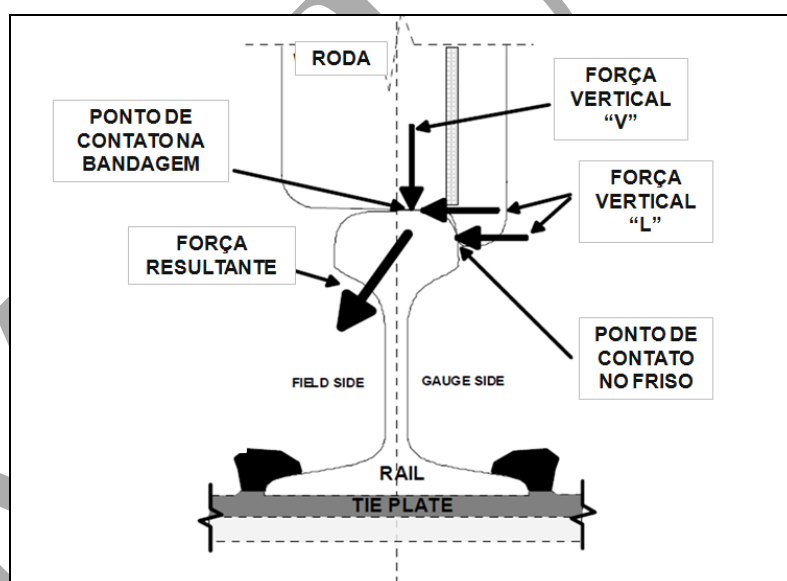
Na perspectiva longitudinal, os esforços observados em curvas ao longo do trem são avaliados em esforços de tração ou compressão. O excesso desses esforços podem gerar as ocorrências conhecidas como efeito “corda” (do inglês *string-lining*) ou efeito “canivete” (do inglês *Jack-knifing*) conforme Figura 4.

Esses esforços longitudinais são desdobrados em forças laterais amplificadas, aumentando significativamente a força lateral nos trilhos. Dessa forma, e de acordo com nível de resistência transversal da grade e do estado de fixações do trilho os efeitos desses esforços são de importante conhecimento para prevenção de ocorrências ferroviárias como escalada de trilho, arraste de grade ou reviramento do trilho externo em curvas.



**Figura 4:** Representação das forças longitudinais entre vagões

Conforme descreve Magalhães (1998), o inter-relacionamento entre força lateral (L) e força vertical (V) atuantes na roda, determina a tendência ao reviramento do trilho ou ao descarrilamento. Assim, quanto maior a relação  $L/V$  em um estado analisado maior a probabilidade de ocorrência de reviramento do trilho ou descarrilamento através de escalada de roda. Observam-se na Figura 5 as forças atuantes na interface roda x trilho.

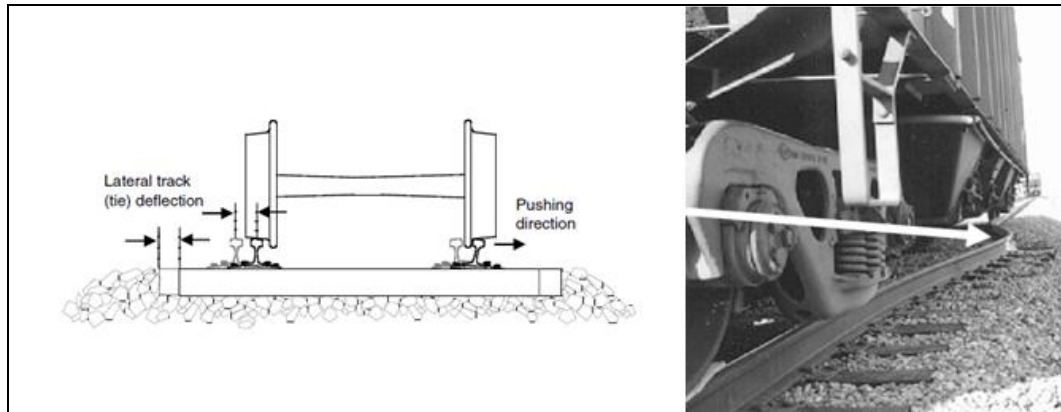


**Figura 5:** Representação das forças atuantes na interface roda x trilho

Autores e referências normativas indicam que valores superiores a 0,82 da relação  $L/V$  aumentam significativamente a probabilidade de ocorrência de descarrilamentos. Para o reviramento de trilhos, o limiar indicado é de 0,64 dessa relação. Porém com o advento de novas fixações elásticas, adota-se para o presente estudo que não haverá risco para essa última condição. No máximo poderá haver como se observa em pontos de maior sollicitação, rompimento ou afrouxamento de alguns elementos de fixação.

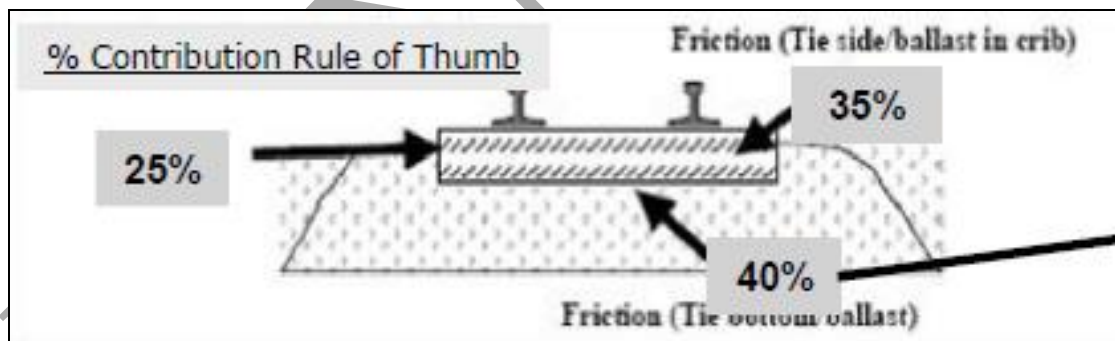
No contexto de análise de força lateral, se faz importante analisar a capacidade da grade ferroviária suportar os níveis de esforços sem ocorrer deformações no eixo transversal da via.

Este fenômeno na literatura técnica ferroviária é denominado arraste de grade (do inglês *track shift*) é ocasionada devido ao aumento da força lateral por esforços longitudinais de condução do trem e de novo patamar de carregamento do vagão, assim como relacionado ao aumento de velocidade, de aumento de carga por eixo. Esse efeito é amplificado em linha não estabilizada, com condições de lastro ruim (ombro e granulometria) e existência de defeitos de alinhamento. O exemplo de baixa resistência lateral da grade é apresentado da Figura 6.



**Figura 6:** Representação das forças resistentes à força lateral atuante na grade ferroviária

As parcelas da configuração de superestrutura que contribuem para equilíbrio das forças laterais atuantes são as resistências de fricção entre lastro e dormente, ombro de lastro e massa de dormente conforme Figura 7 de Kish (2011).



**Figura 7:** Representação das forças resistentes à força lateral atuante na grade ferroviária

A avaliação desse efeito pode ser realizada através da comparação entre a força lateral efetiva exercida e o critério de *Prud'homme* conforme Joy (2010). O critério de *Prud'homme* é descrito conforme a seguinte equação (1):

$$L < 0,85 \cdot \left( 10 + \frac{V}{3} \right) \quad (1)$$

em que L: força lateral efetiva [kN] e  
V: carga por eixo [kN].

O fator de redução de 0,85 visa abranger as incertezas de condições de via.

### 2.1.2. Plano de Instrumentação de Via e Vagões

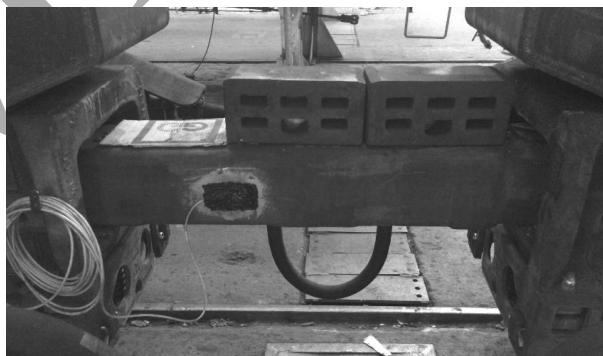
Para avaliação dos efeitos reais na via e nos vagões para efeitos comparativos e de calibração dos testes, se fez necessária a instrumentação de segmentos de via e dos vagões em análise.

Para a via foi definido o segmento de três quilômetros localizados na Serra do Mar por possuir a combinação mais restrita de geometria de curva e rampa com valores extremos de esforços de compressão e choques. Esta curva horizontal instrumentada possui 230 metros de raio e está localizada sob ponto de inflexão de rampa. Esta indicação foi obtida através de simulações de softwares de condução de trens. A instrumentação deste local foi composta por duas ilhas com quatro sensores cada, sendo dois leitores verticais e dois leitores horizontais em cada fila de trilhos.

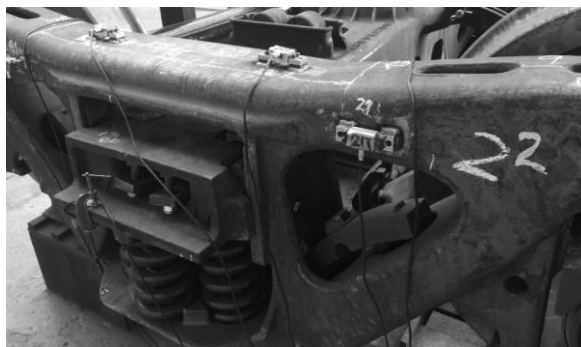


**Figura 8:** *Strain-gauges* instalados em trilho para leitura de forças vertical e horizontal

Referente a instrumentação de vagões foram instalados sensores e *strain-gauges* nos engates, nos truques e sensores de velocidade, GPS e pressão no encanamento geral de freios. Com essas instrumentações foi possível o monitoramento de forças verticais e laterais nas rodas, esforços de compressão e tração no engate. Nas Figuras 9 e 10 estão apresentados os sensores instalados nos componentes dos vagões GDU na MRS Logística.



**Figura 9:** *Strain-gauges* instalados na haste entre vagões GDU



**Figura 10:** *Strain-gauges* instalados no truque

### 2.1.3. Simulações

Para avaliação da resposta dinâmica entre via e vagão as primeiras análises foram realizadas em softwares específicos. Para a dinâmica do trem em seu conjunto longitudinal foi utilizado software de análise de condução de trens, e para as análises entre via e vagão foi utilizado o software *Vampire* da *Delta Rail*.

Nas primeiras análises observou-se que o segmento carregado da Ferrovia do Aço não apresentava valores diferenciados quanto ao modelo corrente de operação na MRS. Foi avaliado o mesmo comprimento de trem padrão variando o modelo de vagão e sua massa total. Assim variando do modelo de tração concentrada com 134 vagões GDT totalizando nominalmente 17.420 toneladas brutas para o modelo com mesma tração com 134 vagões GDU totalizando 19.296 toneladas.

Para a Serra do Mar observou-se através de ambas as simulações esforços próximos às referências de segurança. Assim optou-se por realizar ensaios com crescimento gradual na lotação total, variando de 124 vagões até a formação alvo completa com 134 vagões. Dessa forma tornou-se alvo do estudo da dinâmica segura de trens a operação na Serra do Mar.

### 2.1.4. Resultados

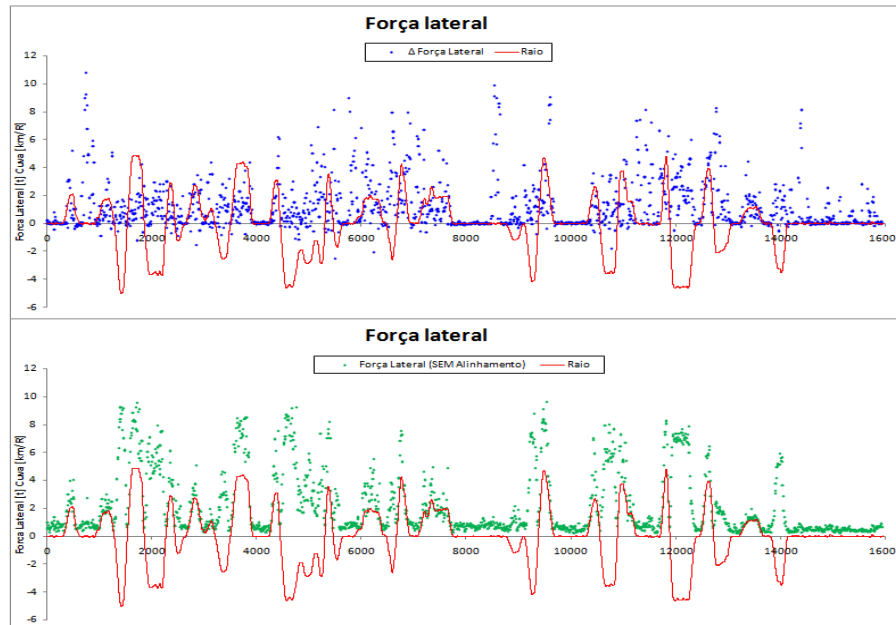
Durante as medições iniciais de esforços na via foram identificados valores de exceção elevados para a força lateral mesmo com todos os parâmetros de manutenção de vagões e via dentro dos níveis aceitáveis. A MRS replica para sua manutenção de forma conservadora os valores preconizados em normas da AAR e FRA americanas.

Com a análise dessas exceções pontuais através do *Vampire* foi observada a sensibilidade do parâmetro de defeito de alinhamento. Mesmo com valores abaixo dos valores de referência manutenção observou-se que a força lateral resultante incrementou os valores de L/V. Desta forma, a primeira conclusão do estudo foi a influência de defeitos de alinhamento na amplitude de força lateral observada. Para vagões GDU com 144 toneladas de carregamento, defeitos de desalinhamento na ordem de 15 mm (para um limite de manutenção de 44 mm) ampliaram a força lateral em 40%. A Figura 11 apresenta de forma comparativa os efeitos observados através de simulação de força lateral em tangentes com defeitos de alinhamento abaixo dos valores de referência.

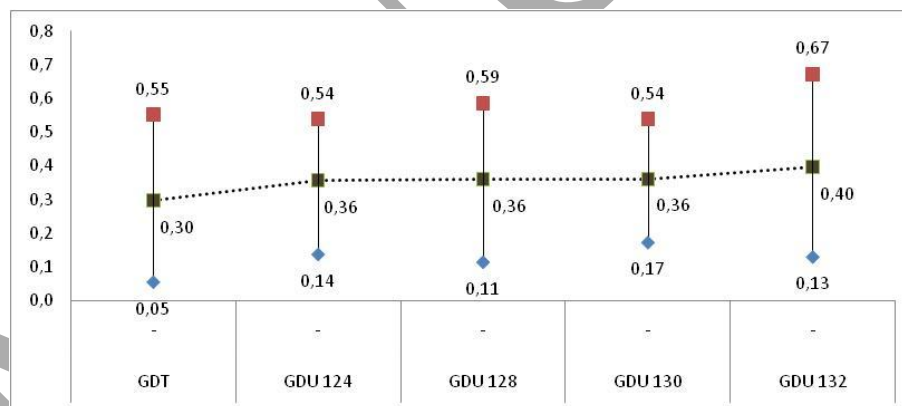
Através da coleta de dados de forças laterais e verticais na via e nos rodeiros foi observado um padrão de incremento de esforços a partir da variação do comprimento do trem com GDU. O resumo de valores de L/V máximos, médio e mínimo calculados é apresentado na Figura



12. Esta compilação apresenta os resultados a partir da base de referência GDT e do GDU variando de 124 a 132 vagões na composição. Pode-se observar que os valores médios se mantiveram abaixo do valor crítico de referência de 0,6 apesar do significativo aumento de força lateral medido na via.

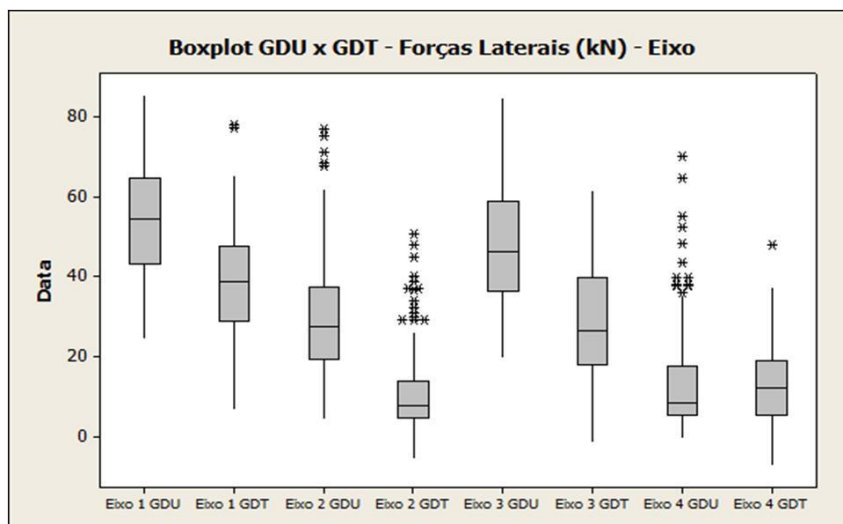


**Figura 11:** Gráfico de análise de força lateral x curvatura x canal alinhamento



**Figura 12:** Resultados de L/V nas rodas para as combinações avaliadas

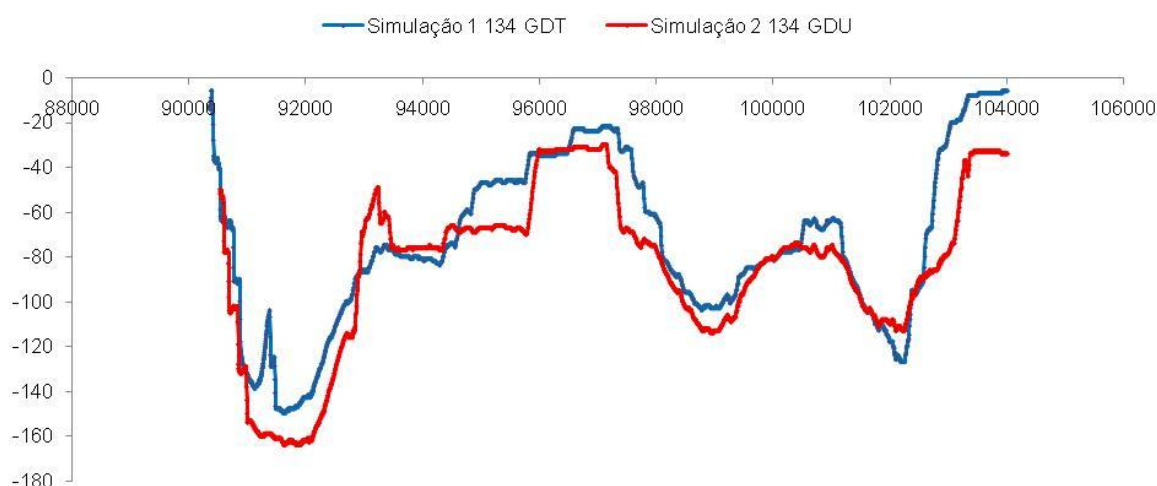
Referente aos valores de força lateral, esses valores variaram de 35 kN na média para vagões GDT a 60 kN para vagões GDU com 144 toneladas, representando um aumento de 70% nesse parâmetro. Na Figura 13 são comparados os valores de força lateral medidos por eixo do truque em um GDT com valores coletados do vagão GDU, sendo o eixo denominado 'Eixo 1' como o de ataque no sentido de deslocamento.



**Figura 13:** Resultados de força lateral nas rodas por tipo de truque

Com a análise de força lateral foi possível também a avaliação de resistência da grade quanto a um possível arraste devido a força atuante ser maior do que a força resistente. No cenário mais agressivo para a via avaliado com 132 vagões carregados GDU, do total de 528 eventos apenas 14 foram acima do valor crítico de *Prud'homme* e de forma pulverizada ao longo do trem. Sendo assim, não foi considerado como fator crítico para a via, uma vez que medidas com veículo de inspeção de geometria também não acusaram deformação da curvatura em questão.

Referente às análises de esforços entre vagões, a análise inicial através de simulações apresentou que o comportamento seria similar a operação do trem convencional. Porém foi observado um incremento de esforço de compressão entre os marcos quilométricos 90 e 92 onde a simulação apontou um aumento de 140 para 160 toneladas uma vez que a referência de segurança para este segmento é de 140 toneladas para o trem com 134 vagões GDU. A Figura 14 apresenta as curvas simuladas para os modelos GDT e GDU.



**Figura 14:** Resultados da simulação de esforços em engates GDU x GDT – unidade: toneladas

Através da simulação e dos dados coletados da instrumentação observou-se uma variação máxima de 10% e de 3% na média, assim validou-se o modelo de simulação em relação ao real medido através da instrumentação dos engates variando a posição do mesmo na composição.

Com a evolução dos estudos observou-se que o modelo com 132 vagões GDU atingiu valores em engates próximos aos valores críticos que amplificam os valores de L/V atuantes na parte central do trem. Após análises refinadas e tentativas de melhorias no padrão de condução do trem foi observado que o fator limitante para redução dos esforços é a combinação agressiva de rampas no segmento entre os marcos 90 e 92 da Serra do Mar para o modelo atual de trens da MRS. A diferença de velocidade significativa entre as partes do trem na distribuição atual de perfil da Serra do Mar é o principal fator de esforços consideráveis e valores elevados de L/V na parte central do trem em análise. Dessa forma conclui-se o estudo sendo a formação mais segura para o trem composto de GDU a lotação com 132 vagões.

### 3. CONCLUSÕES

No contexto de aumento de produtividade sem perdas no nível de qualidade de serviço e segurança, foram apresentados neste artigo a metodologia e resultados para operacionalizar um modelo de trem de maior lotação com o mesmo comprimento do modelo convencional na MRS Logística. A partir de referências de testes realizados em outras ferrovias, revisão dos conceitos implícitos de dinâmica ferroviária, análises de simulações específicas e medições reais coletadas através de instrumentações, foi realizado com sucesso testes de operações seguras deste modelo de trem com 36 toneladas por eixo, sendo limitada a quantidade em 132 vagões devidos aos valores envolvidos de esforços. Estudos complementares estão em desenvolvimento para quantificar os custos de manutenção envolvidos no aumento de carga por eixo proposto para os próximos anos na MRS.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aronian, A.; K. Wachs, e M. Jamieson (2013). Train Marshalling Process at Canadian Pacific. *Anais do 23<sup>rd</sup> International Railway Safety Conference*, Vancouver, Canadá.
- Joy, R. (2010). *Analysis of in-train forces at increased axle loads for Estrada de Ferro Carajás* (Relatório de Pesquisa/2010), Pueblo, CO, Transportation Technology Center Inc., Association of American Railroads.
- Kish, A. (2011). On the Fundamentals of Track Lateral Resistance. *Anais do AREMA 2011 Annual Conference*, Minneapolis, MN, Estados Unidos.
- Magalhães, P. C. B (1998) *Uma contribuição ao estudo da resistência transversal das ferrovias à tração múltipla*. Instituto Militar de Engenharia, Brasil.