



AVALIAÇÃO DO AUMENTO DE VELOCIDADE DE VAGÕES TANQUE COM BASE EM DINÂMICA VERTICAL E LONGITUDINAL, UTILIZANDO VAMPIRE E FTS

Camila Moscibrocki¹

1Rumo S.A. - Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia de avaliação para aumento de velocidade operacional de vagões tanque, integrando simulação longitudinal no Freight Train Simulator (FTS) com simulação multicorpos no VAMPIRE. O estudo consolida duas campanhas técnicas realizadas em corredores da bitola larga e da malha central, com comparação entre a condição vigente de 58 km/h e cenários de 64, 70 e 72 km/h. Na dimensão longitudinal, os esforços de tração e compressão obtidos no FTS foram usados como entrada para a modelagem dos elementos de conexão entre veículos, contemplando engates e aparelhos de choque e tração (ACTs). Na dimensão vertical, foram avaliadas as respostas em bounce e pitch, a razão L/V , o alívio de roda e a coincidência entre frequências naturais do vagão e comprimentos de onda críticos da via. A metodologia evoluiu de uma seleção trechos com defeitos característicos para um procedimento baseado em autovalores, FFT espacial e ranqueamento de hotspots de excitação. Os resultados mostram que o aumento de velocidade não deve ser tratado como decisão generalista para toda a malha: em trechos com deficiência de superelevação e irregularidades combinadas houve amplificação da aceleração vertical e aumento do alívio de roda, enquanto em segmentos específicos da malha central a resposta dinâmica permaneceu dentro dos critérios de aceite, permitindo avanço para testes controlados. Conclui-se que a revisão da VMA para trens tanqueiros deve ser condicionada à qualidade geométrica da via, à compatibilidade entre frequência de excitação e modos do veículo e à interação com os esforços longitudinais do trem.

Palavras-chave: Vagão tanque, VAMPIRE, FTS, dinâmica veicular, Velocidade operacional.

1. INTRODUÇÃO

Vagões tanque apresentam sensibilidade elevada a perturbações geométricas da via quando comparados a outros tipos de vagões de carga, em razão da maior rigidez estrutural da caixa e da forma como as torções impostas pela via se traduzem em alívio de roda e crescimento da razão entre força lateral e vertical no contato roda-trilho (TYRELL, 1986; HUNGRIA, 2021). Em ambientes com deficiência de superelevação, desnivelamentos combinados ou comprimentos de onda críticos, a elevação da velocidade pode ampliar a resposta dinâmica vertical e reduzir a margem de segurança frente aos critérios de estabilidade.

Do ponto de vista da dinâmica ferroviária, a avaliação do aumento de velocidade não pode ser feita apenas com base em desempenho operacional. A resposta do veículo depende da interação entre propriedades inerciais, rigidezes e amortecimentos equivalentes das suspensões, geometria de via, velocidade de circulação e condições do contato roda-trilho (GARG; DUKKIPATI, 1984; IKEDA; ESVELT, 2006). Isso ocorre devido às rotações e momentos de inércia de massa específicos para cada um destes vagões, conforme apresentado na figura 1:

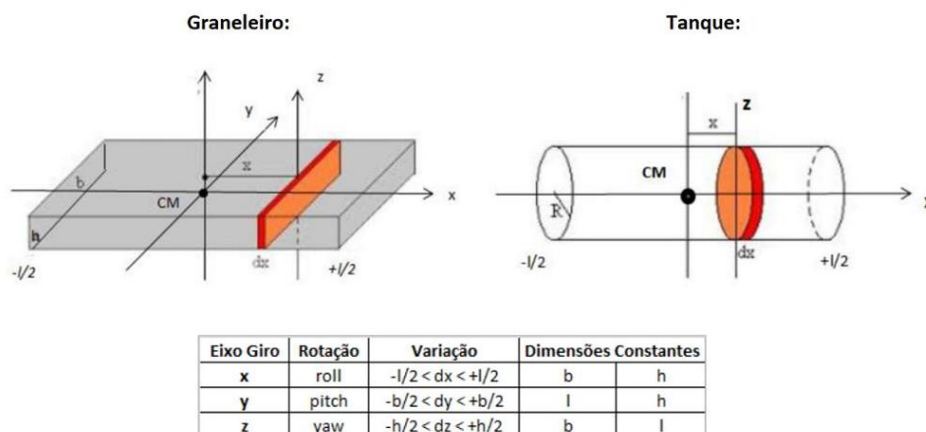


Figura 1. Diferentes frequências rotacionais atribuídas a partir da relação entre os eixos de giro, rotação e variação de massa, para as dimensões constantes atribuídas aos sólidos representativos dos vagões. Fonte: Hungria (2018).

Em trens tanqueiros, essa análise ganha complexidade adicional porque a condição dinâmica global do trem também é influenciada por esforços longitudinais de tração, compressão e choque, os quais alteram a distribuição de carregamentos entre os veículos e podem intensificar respostas locais em trechos críticos.

Neste contexto, o estudo desenvolve uma base metodológica para análise do aumento de velocidade de vagões tanque. A primeira campanha avaliou o aumento de 58 para 70 km/h em trechos entre os municípios de Rondonópolis (MT) até Aparecida do Taboado (MS), descritos na malha ferroviária como TRO-TAG e TAG-TMI, utilizando o VAMPIRE com arquivos de força longitudinal provenientes do FTS e critérios de L/V e alívio de roda como métricas de segurança. A segunda campanha refinou a metodologia para a malha central, avaliando 58, 64 e 72 km/h nos segmentos que se estendeu do município de Porto Nacional (TO) até estrela do Oeste (SP) descritos na malha ferroviária como PPN-POS, POS-PAS e PAS-ZRL, incorporando autovalores, frequências naturais, FFT espacial, seleção de comprimentos de onda críticos e ranqueamento de *hotspots* de excitação.

O objetivo deste artigo é consolidar essas duas campanhas em um formato acadêmico, propondo uma metodologia integrada para avaliação do aumento de velocidade de vagões tanque com base em dinâmica vertical e longitudinal, utilizando VAMPIRE e FTS. Busca-se evidenciar o racional físico que sustenta a tomada de decisão por trecho, destacando a importância da compatibilização entre resposta modal do veículo, qualidade geométrica da via e esforços longitudinais do trem.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Base Técnica E Escopo Dos Estudos

O artigo foi estruturado a partir de duas frentes complementares. A primeira, analisou a viabilidade de elevar a VMA de 58 para 70 km/h para vagões tanque carregados em trechos selecionados da bitola larga, priorizando locais com deficiência de superelevação, irregularidade vertical e histórico de resposta dinâmica desfavorável. A segunda avaliou a possibilidade de operar a 64 e 72 km/h na malha central, em corredores escolhidos por reunirem rampas, curvas de pequeno raio e registros de esforços dinâmicos relevantes em trens tanqueiros.

Em ambas as campanhas foi adotado o vagão TCT carregado como veículo representativo. As propriedades de massa, centro de gravidade e momentos de inércia da caixa foram utilizadas na modelagem dinâmica, conforme figura 2:

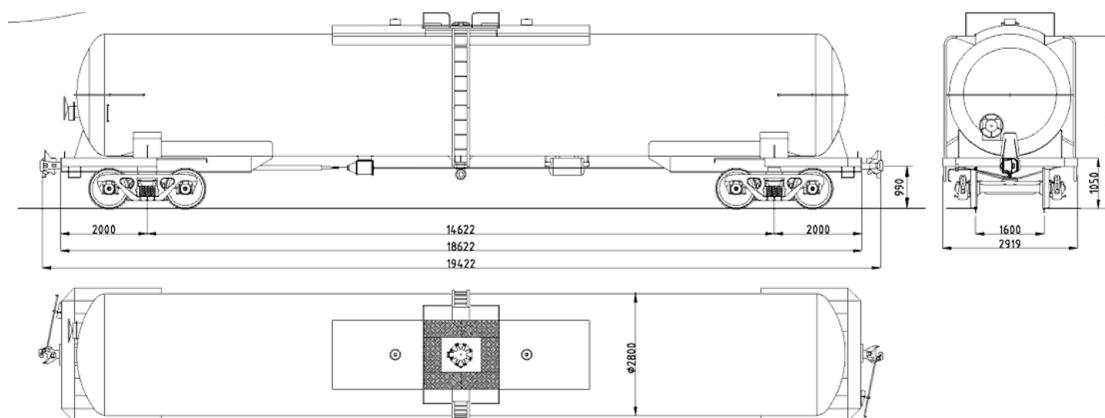


Figura 2. Vagão TCT 01. Fonte: Rumo (2022).

O perfil de via foi importado por meio de arquivos .dat do VAMPIRE utilizando como base as leituras do vagão instrumentado ATGMS contendo distância, superelevação, raio de curva, alinhamento vertical, alinhamento lateral e bitola. Para os estudos longitudinais, os esforços de tração, compressão e choque foram obtidos por simulação no FTS e convertidos em arquivos de entrada para a modelagem do trem. A tabela 1 sumariza as campanhas realizadas e focos metodológicos:

Tabela 1. Síntese das campanhas técnicas consolidadas neste artigo.

Campanha	Trechos analisados	Velocidades comparadas	Foco metodológico
A	TRO-TAG e TAG-TMI	58 e 70 km/h	Resposta a defeitos geométricos característicos com integração das forças longitudinais do FTS
B	PPN-POS, POS-PAS e PAS-ZRL	58, 64 e 72 km/h	Autovalores, FFT espacial, comprimentos de onda críticos e simulação dirigida em hotspots

Para explicitar as entradas das simulações, cada cenário foi definido pela combinação entre: geometria de via medida, estado carregado do vagão TCT, velocidade operacional analisada e histórico longitudinal de cargas do trem. A excitação geométrica foi importada dos arquivos .dat do VAMPIRE, estruturados em base espacial, contendo distância, superelevação, raio de curva, alinhamento vertical, alinhamento lateral e bitola. A excitação operacional longitudinal foi obtida a partir das séries de tração, compressão e choque calculadas no FTS para cada trecho e velocidade. Essas séries foram tratadas como históricos ao longo do tempo/distância, e não como valores máximos isolados, permitindo sincronizar a evolução das forças nos engates e ACTs com a posição do trem sobre os defeitos geométricos avaliados.

2.2. Modelagem Longitudinal Com O FTS

Na análise longitudinal, os esforços internos do trem foram obtidos no simulador FTS, considerando perfil de via, operação do trem e características dos veículos. Esses esforços foram utilizados para gerar históricos de tração, compressão e choque ao longo do trem e por posição relativa entre veículos. O procedimento permitiu importar para o VAMPIRE não apenas a geometria da via, mas também as solicitações longitudinais que atuam sobre os engates e ACTs em cada cenário de velocidade. A figura 3 apresenta os esforços para o trem a 50 km/h:

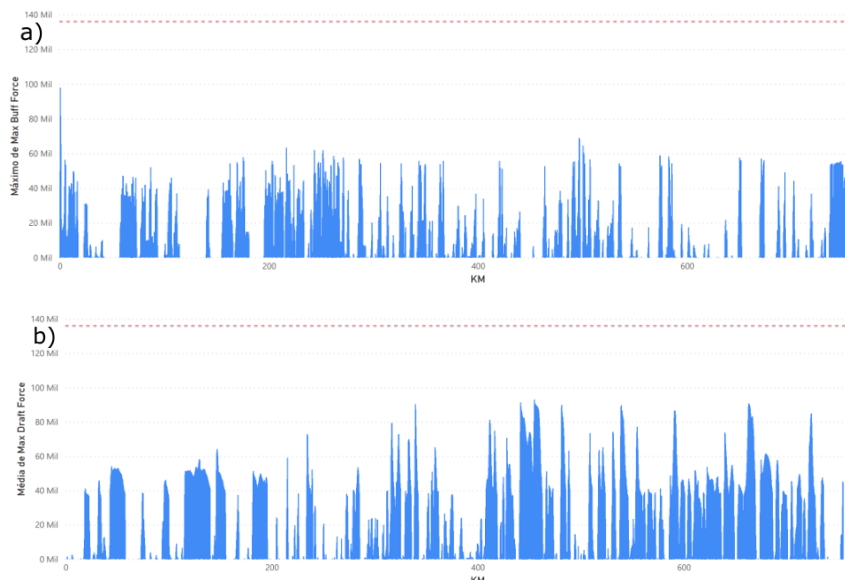


Figura 3. a) Esforços de compressão a 50 km/h. b) Esforços de tração a 50 km/h. Fonte: Autores (2026).



Figura 4. a) Esforços de compressão a 70 km/h. b) Esforços de tração a 70 km/h. Fonte: Autores (2026).

Os engates foram representados como elementos não lineares com folga inicial e rigidez equivalente variável após o fechamento da folga. As forças entre vagões são calculadas com base nas saídas geradas pelo simulador longitudinal FTS 01 e na deformação dos elementos de conexão bem como nos ângulos relativos entre conectores e a massa suspensa dos vagões. A figura 5 apresenta a simplificação da linear característica de rigidez não linear do acoplamento:

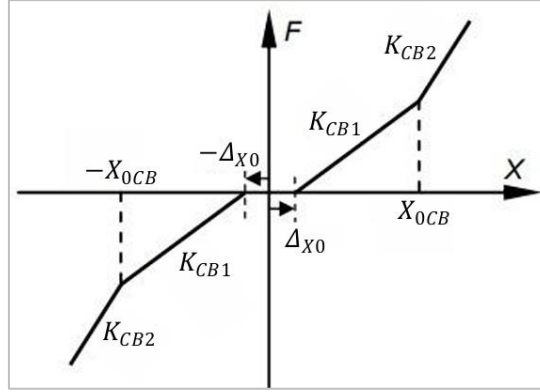


Figura 5. Característica não linear do engate modelado. Fonte: Rumo (2022).

As forças do engate são calculadas por:

$$F_{cg} = \begin{cases} 0, & |\Delta x| < \Delta x_0, \\ K_{CB1}(\Delta x - \Delta x_0), & \Delta x_0 \leq |\Delta x| \leq X_{0CB}, \\ K_{CB1}(X_{0CB} - \Delta x_0) + K_{CB2}(\Delta x - X_{0CB}), & |\Delta x| > X_{0CB}, \end{cases} \quad (1)$$

Onde Δx é o deslocamento relativo entre as extremidades dos engates que conectam os vagões adjacentes na direção axial; Δx_0 é a folga do engate; x_{0CB} é o comprimento inicial do engate e K_{CB} é o coeficiente de rigidez equivalente.

Com base nas respostas dinâmicas dos vagões e na relação geométrica entre os engates e as extremidades da massa suspensa dos veículos, os ângulos laterais e verticais entre o engate e os veículos adjacentes podem ser calculados (DUKKIPATI, 1984). Para explicitar essa etapa, adotou-se a relação geométrica simplificada da Equação (2a), em que α_{CB} e β_{CB} representam, respectivamente, os ângulos lateral e vertical do engate.

$$\alpha_{CB} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta y_{CB}}{X_{0CB} + \Delta X}\right), \beta_{CB} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta z_{CB}}{X_{0CB} + \Delta X}\right) \quad (2a)$$

Na Equação (2a), Δy_{CB} e Δz_{CB} representam os deslocamentos relativos lateral e vertical entre os pontos de conexão dos veículos adjacentes, enquanto $x_{0CB} + \Delta x$ representa o comprimento axial instantâneo do acoplamento. Com esses ângulos, obtêm-se as componentes longitudinal, lateral e vertical das forças do engate aplicadas aos vagões adjacentes. As forças nos ACTs entre vagões são dadas por:

$$F_{CDL,R} = \begin{cases} C_{CD1}\Delta V_{CDL,R}, & |\Delta V_{CDL,R}| < V_{0CD}, |\Delta X_{CDL,R}| \leq X_{0CD}, \\ \text{sign}(\Delta V_{CDL,R})[C_{CD1}V_{0CD} + C_{CD2}(|\Delta V_{CDL,R}| - V_{0CD})], & |\Delta V_{CDL,R}| \geq V_{0CD}, |\Delta X_{CDL,R}| \leq X_{0CD}, \\ \text{sign}(\Delta X_{CDL,R})K_{CD}(|\Delta X_{CDL,R}| - X_{0CD}), & |\Delta V_{CDL,R}| \geq V_{0CD}, |\Delta X_{CDL,R}| > X_{0CD}, \end{cases} \quad (2)$$

Onde F_{CDi} ($i=L, R$) são as forças de interação dos ACTs (modelados como amortecedores longitudinais) entre vagões; C_{CD} e K_{CD} representam os coeficientes do amortecedor equivalente e da mola equivalente, respectivamente; V_{0CD} é a velocidade de deslocamento do ACT entre vagões; X_{0CD} é o comprimento inicial do ACT entre vagões; ΔV_{CD} e ΔX_{CDi} ($i=L, R$) são a velocidade relativa e o deslocamento entre as extremidades dos amortecedores entre vagões que conectam vagões adjacentes na direção axial, respectivamente e i ($i=L, R$) refere-se ao amortecedor longitudinal entre vagões esquerdo ou direito.

A incorporação desses esforços no VAMPIRE foi importante porque a segurança do vagão tanque não depende apenas da resposta vertical isolada. Em regiões de tração e compressão elevadas, o acoplamento

geométrico entre veículos modifica as componentes laterais e verticais transmitidas pelos elementos de conexão, alterando a solicitação total percebida pelo vagão em trechos críticos.

2.3. Modelagem e Critérios de Estabilidade no VAMPIRE

Utilizando o mesmo processo de cálculo do ângulo do engate, os ângulos relativos entre os ACT, elementos de conexão e amortecedores são então calculados, permitindo a obtenção das forças causadas pelos amortecedores entre vagões nas direções x, y e z. A figura 6 apresenta o detalhamento da modelagem entre veículos e os elementos de conexão:

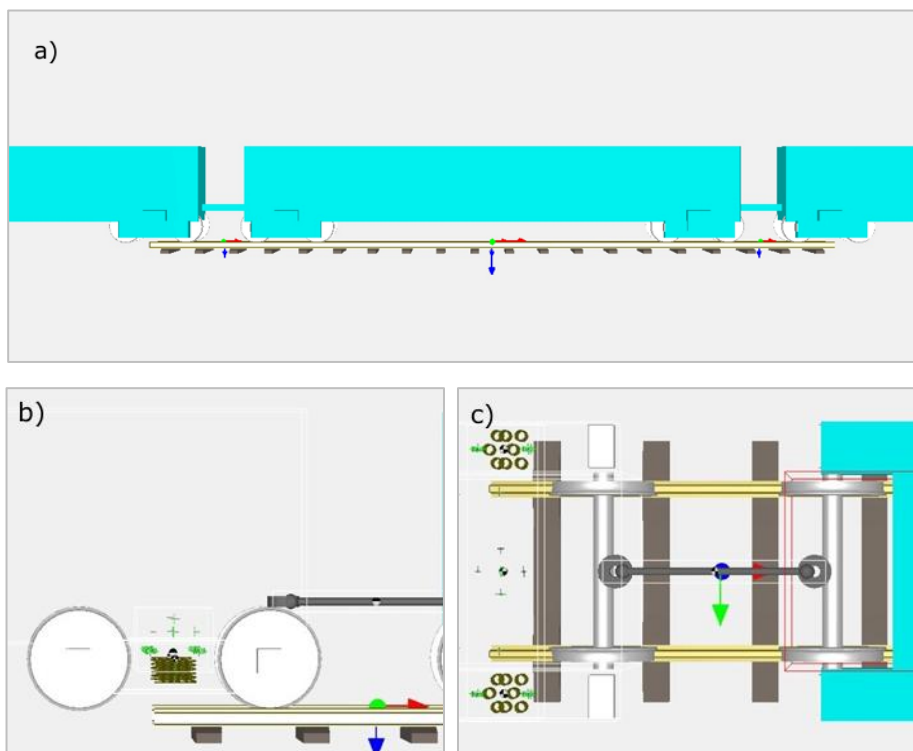


Figura 6. a) vagões adjacentes. b) detalhamento do elemento de conexão entre vagões e amortecedores. c) Vista superior da conexão entre vagões. Fonte: Autores (2026).

Para a análise de estabilidade e resposta dinâmica do veículo, foi utilizada modelagem multicorpos no VAMPIRE, com ênfase nos modos globais da caixa associados a *roll*, *bounce* e *pitch*. A formulação linearizada para pequenas oscilações em torno da condição de operação pode ser representada pela Equação 3, em que as matrizes de massa, amortecimento e rigidez são excitadas pelas irregularidades da via convertidas em forças equivalentes nos pontos de contato roda-trilho.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}(\mathbf{t}) \quad (3)$$

Na Equação 3, $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$ e $\ddot{\mathbf{q}}$ representam, respectivamente, os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração generalizados; $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ e $\mathbf{K}$ representam as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema. O termo $\mathbf{F}(\mathbf{t})$ agrega as forças equivalentes introduzidas pelas irregularidades de via aplicadas nos pontos de contato de cada truque/rodado, convertidas para força e torque em relação ao centro de gravidade da caixa. As propriedades de inércia do vagão TCT Rumo são apresentadas na tabela 2:

Tabela 2. As propriedades de inércia abaixo se referem à caixa do vagão TCT Rumo carregado, sem considerar os truques.

Condição	Massa(tf)	CG da caixa (mm)	Ixx (kg·mm ²)	Iyy (kg·mm ²)	Izz (kg·mm ²)
Carregado	104.28	2403	1.18E+11	3.17E+12	3.15E+12

Considera-se a massa suspensa apoiada nos dois truques por suspensões secundárias equivalentes, com rigidez/damping verticais K_1 , C_1 (truque A) e K_2 , C_2 (truque B). Os centros dos truques estão a uma distância $2a$ entre si; o CG da carroceria é tomado no meio do vão (hipótese simétrica). Os graus de liberdade são:

- z (*bounce*, deslocamento vertical da carroceria);
- x (*pitch*, rotação longitudinal da carroceria).

Vetor de estados $q = [z \ \theta_z]^T$. As matrizes do sistema linearizado são:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_{yy} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & a(C_2 - C_1) \\ a(C_2 - C_1) & a^2(C_1 + C_2) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & a(K_2 - K_1) \\ a(K_2 - K_1) & a^2(K_1 + K_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Na hipótese simétrica (mesma suspensão nos dois truques: $K_1 = K_2 = K$, $C_1 = C_2 = C$ os termos de acoplamento se anulam, e as frequências naturais não amortecidas (ω_n) são:

$$\omega_z^2 = \frac{2K}{m}, \quad \omega_\theta^2 = \frac{2Ka^2}{I_{yy}} \quad (5)$$

As frequências em Hz são $f = \omega/(2\pi)$. A tabela 3 apresenta os valores das frequências de excitação para cada modo de vibrar do vagão TCT a partir dos autovalores calculados pelo VAMPIRE:

Tabela 3. Frequências naturais por modo de vibração do vagão TCT carregado.

Velocidade (km/h)	Roll (Hz)	Bounce (Hz)	Yaw (Hz)	Pitch (Hz)
64	0.848	2.343	2.475	3.292
72	0.851	2.343	2.486	3.292

As frequências naturais obtidas por autovalores para o vagão TCT carregado foram da ordem de 0,848 Hz para *roll*, 2,343 Hz para *bounce* e 3,292 Hz para *pitch* nas velocidades analisadas, com pequena variação dos demais modos globais. A partir desses valores, foram determinados os comprimentos de onda críticos da via capazes de excitar o veículo nas velocidades de 58, 64 e 72 km/h. A frequência de excitação foi relacionada à velocidade e ao comprimento de onda conforme a Equação 7.

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (7)$$

As bandas críticas alvo (*bounce* e *pitch*) são determinadas a partir dos comprimentos de onda críticos por velocidade, conforme tabela 4:

Tabela 4. Comprimentos de onda críticos por velocidade.

Velocidade	λ p/ <i>Bounce</i> ($\approx 1,98$ Hz)	λ p/ <i>Pitch</i> ($\approx 2,62$ Hz)
58 km/h (16,11 m/s)	8,14 m	6,15 m
64 km/h (17,78 m/s)	8,98 m	6,79 m
72 km/h (20,00 m/s)	10,10 m	7,63 m

Além da análise modal, os critérios de aceite adotados seguiram a prática interna e a referência normativa utilizada nos relatórios: L/V máximo de 0,80 como limite de referência operacional da Rumo, com comparação ao envelope AAR de 1,00, e alívio de roda máximo de 60% como critério interno conservativo. Também foi considerado o requisito de permanência temporal e espacial dos picos críticos, limitado a 0,05 s e 0,91 m, respectivamente.

Tabela 5. Critérios de estabilidade adotados.

Indicador	Limite adotado na análise
Razão L/V do truque	0,80
Alívio de roda	60%
Persistência do pico crítico	0,05 s e 0,91 m

2.4. Seleção de Hotspots de Excitação

Na primeira etapa do estudo, a seleção dos trechos foi feita a partir da observação de seções de 10 km com defeitos geométricos característicos, priorizando curvas de pequeno raio, deficiência de superelevação e trechos com irregularidades verticais e laterais sequenciais. Essa abordagem foi suficiente para demonstrar a tendência de amplificação da aceleração vertical quando a velocidade foi elevada para 70 km/h em determinados pontos da bitola larga. Posteriormente, no procedimento, os sinais de superelevação, alinhamento vertical e alinhamento lateral foram uniformizados espacialmente, submetidos a detrend e FFT espacial, e depois convertidos em densidade espectral de potência por canal. Em seguida, a energia espectral foi integrada em bandas centradas nos comprimentos de onda críticos associados aos modos do veículo. O resultado foi um sistema de pontuação por janela, com scores para roll, bounce, yaw e pitch, permitindo ranquear os locais mais prováveis de excitação modal e direcionar as simulações no VAMPIRE para os segmentos de maior criticidade. A figura 7 traz a sobreposição dos espectros de Prof e Align com as faixas de λ correspondentes a bounce e pitch:

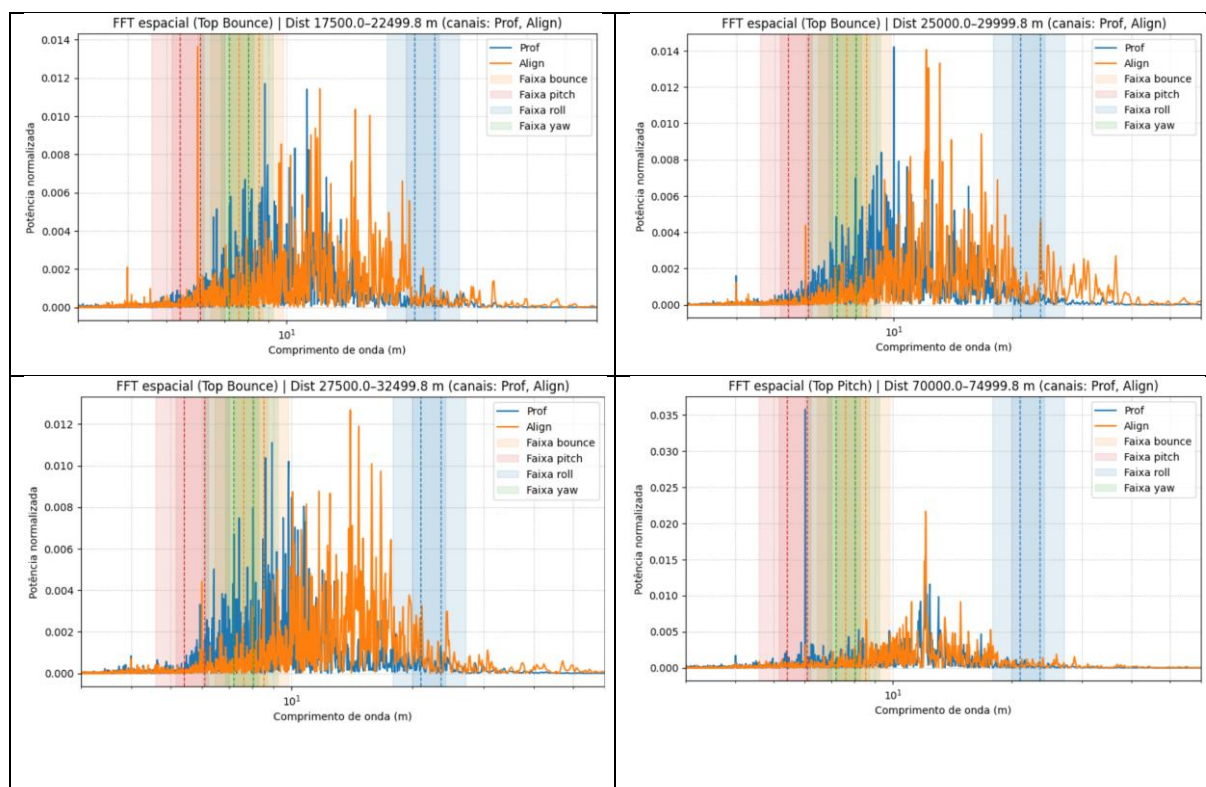


Figura 7 - Sobreposição dos espectros de Prof e Align com as faixas de λ correspondentes a bounce e pitch. Fonte: Autores (2026).

Esse fluxo trouxe duas vantagens principais: reduziu a dependência de seleção empírica de trechos e criou uma ponte objetiva entre a física do veículo e a assinatura geométrica da via. Assim, a decisão de onde simular passou a considerar não apenas a magnitude do defeito, mas principalmente a compatibilidade entre o defeito e a frequência natural do vagão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Síntese dos Resultados da Campanha de TRO-TAG e TAG-TMI

Nos trechos TRO-TAG e TAG-TMI, a comparação entre 58 e 70 km/h mostrou que os valores de L/V permaneceram globalmente abaixo do limite operacional adotado, mas houve crescimento expressivo do alívio de roda em pontos associados a deficiência de superelevação e irregularidades combinadas da via, conforme comparativo da figura 8 e 9:

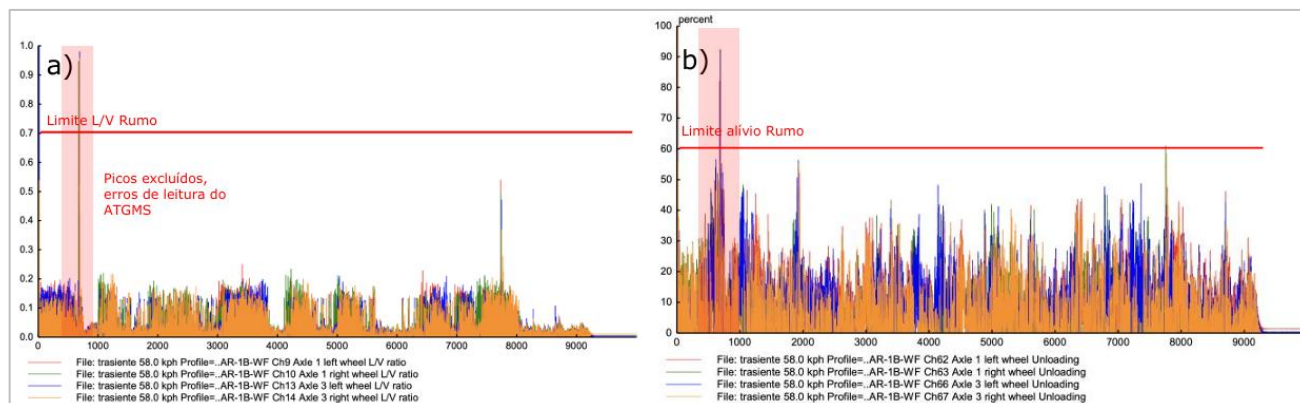


Figura 8. a) L/V a 58 km/h. b) Alívio de rodas a 58 km/h. Fonte: Autores (2026).

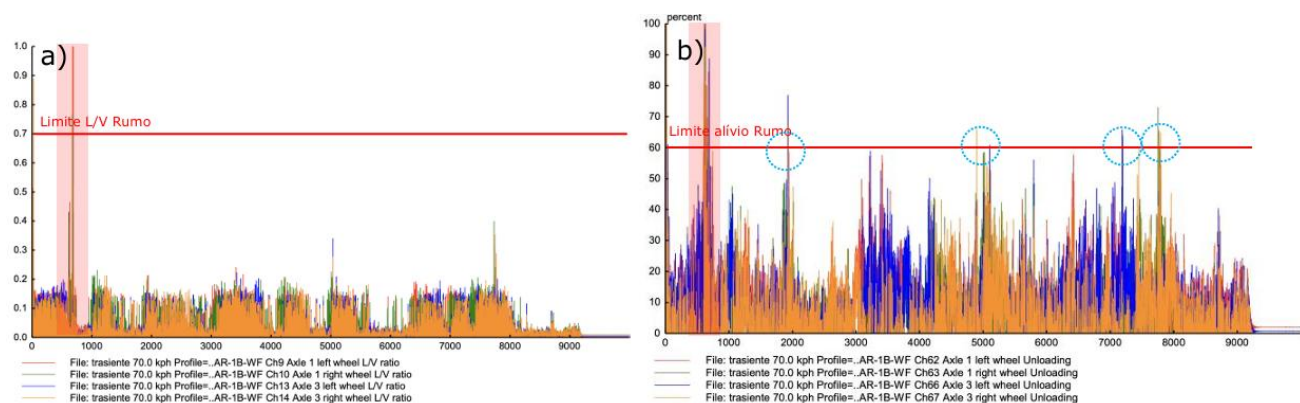


Figura 9. a) L/V a 70 km/h. b) Alívio de rodas a 70 km/h. Fonte: Autores (2026).

Em diversos casos, é possível observar um perfil oscilatório na aceleração vertical do vagão que se amplifica nas perturbações de alinhamento vertical e lateral da via, conforme figura 10:

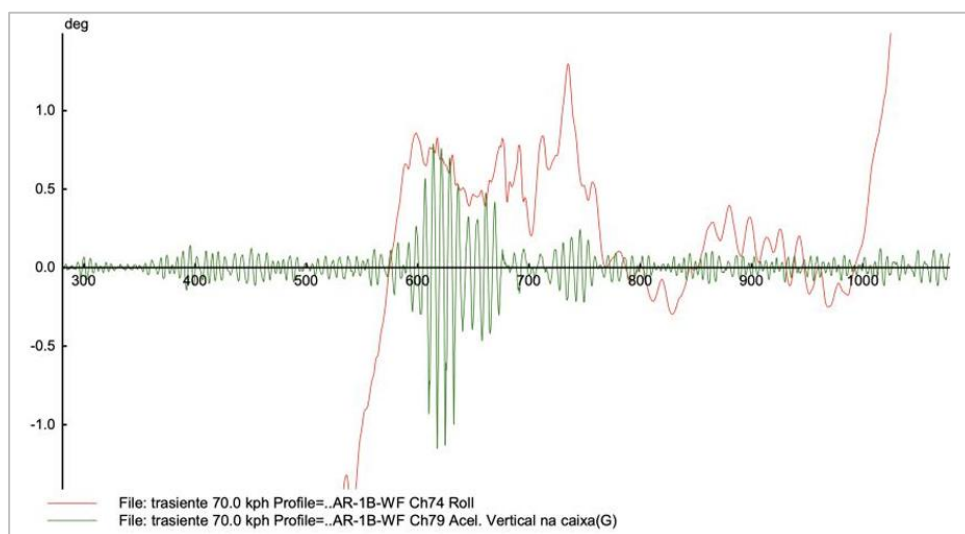


Figura 10 – Perfil oscilatório observado na aceleração vertical na caixa. Fonte: Autores (2026).

Nota-se que a aceleração vertical da caixa apresentou comportamento oscilatório mais pronunciado na condição de 70 km/h, sugerindo proximidade entre a frequência de excitação imposta pela via e a resposta dinâmica do vagão tanque para frequência de *roll*.

Um aspecto relevante foi a inclusão das forças longitudinais do FTS no modelo do trem. Essa integração permitiu avaliar a resposta do veículo em uma condição mais representativa do serviço real, uma vez que o vagão não trafega isolado, mas inserido em um conjunto sujeito a tração, compressão e choques. A conclusão técnica da etapa foi que a simples ausência de extrapolação de L/V não era suficiente para validar aumento de velocidade de forma ampla, sendo necessária investigação adicional sobre comprimentos de onda da via e sua interação com o veículo.

3.2. Síntese dos Resultados da Campanha de PPN-POS, POS-PAS e PAS-ZRL

Na malha central, a metodologia baseada em autovalores, FFT espacial e hotspots confirmou que a criticidade não se distribui uniformemente entre os corredores analisados. Nos segmentos PPN-POS e POS-PAS, as janelas priorizadas por maior score apresentaram extrapolações recorrentes de L/V e alívio de roda nas velocidades elevadas, o que descaracterizou a viabilidade de aumento de velocidade nas condições atuais da via, conforme recorte da figura 11:

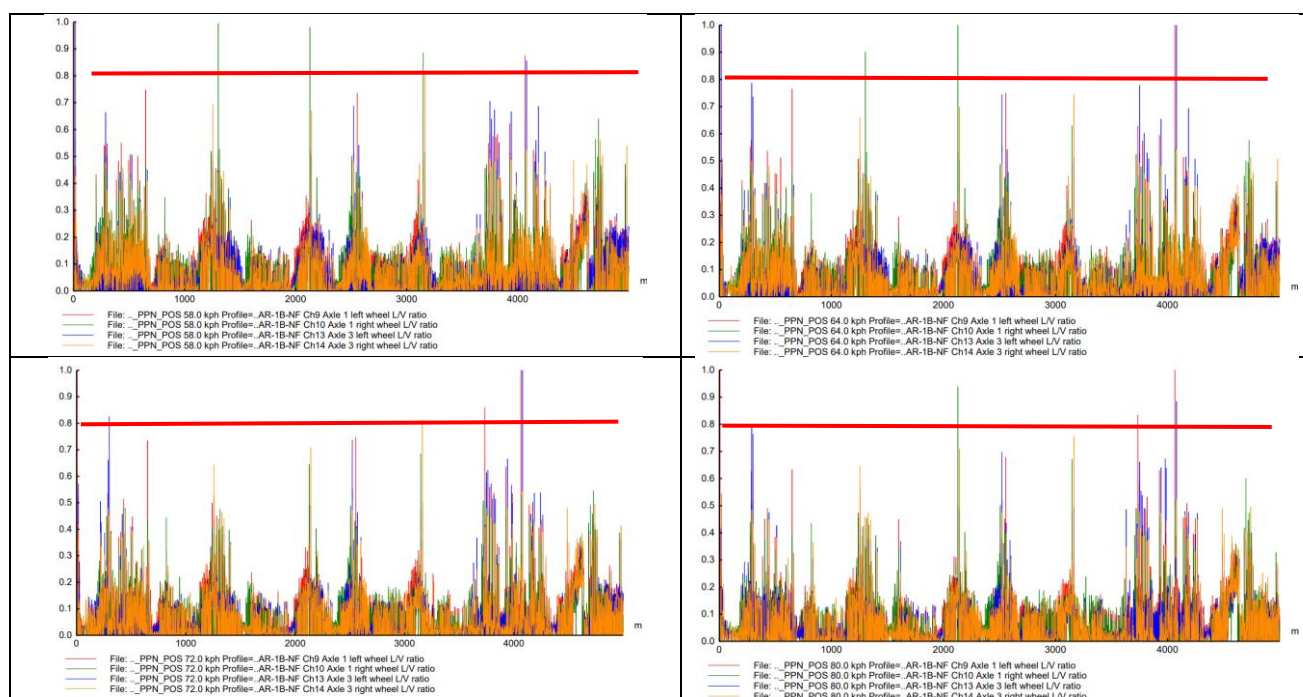


Figura 11. Exemplo de L/V avaliado no trecho de PPN-POS e POS-PAS. Fonte: Autores (2026).

Os valores de L/V e alívio serviram como entrada para validação da influência do bounce no comportamento do vagão (domínio distância/tempo). Através da sincronização de séries reamostradas para um passo espacial único e alinhadas pelo mesmo vetor de distância, aplicou-se um filtro passa-baixas de 0,40 Hz para obter o componente de baixa frequência / envelope do movimento vertical. Isso atenua ruídos de alta frequência e facilita a comparação com grandezas quasi-estáticas (L/V médio e alívio).

Posteriormente séries de L/V (média) e alívio (média) foram suavizadas com a mesma janela espacial usada para correlação (≈ 500 m), reduzindo flutuações locais e destacando tendências por segmento. Para realização da leitura conjunta, analisaram-se os trechos onde picos no *bounce* coincidem com picos em L/V e/ou alívio, e onde a correlação móvel é positiva e significativa, indicando acoplamento físico relevante. A figura 12 apresenta a curva de *bounce* filtrado (aceleração vertical em g, linha azul) comparada às curvas de L/V médio dos eixos (linhas laranja e verde), todas no eixo distância:

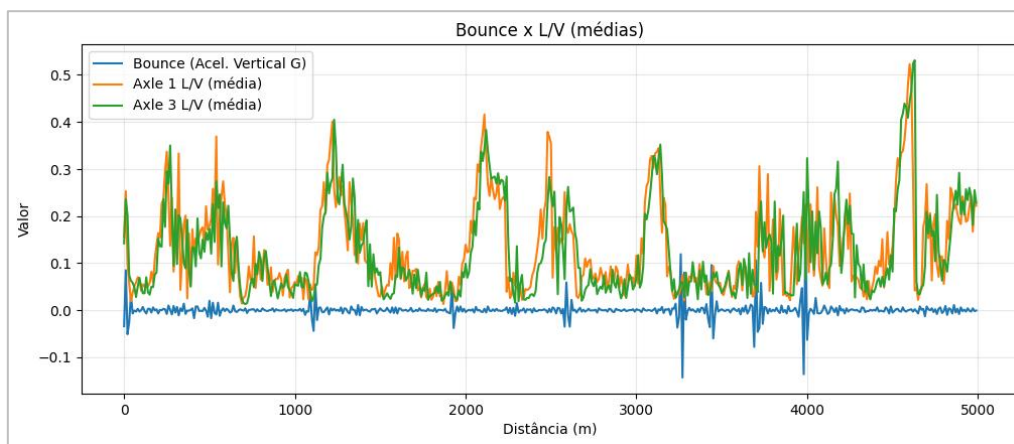


Figura 12. Curva de bounce filtrado vs. curvas de L/V médio. Fonte: Autores (2026).

Por fim, foi realizada uma correlação móvel (janela ≈ 500 m): cálculo do coeficiente de *Pearson* entre *bounce* e cada resposta (L/V e alívio), ao longo do traçado, produzindo séries de correlação espacial, conforme figura 13.

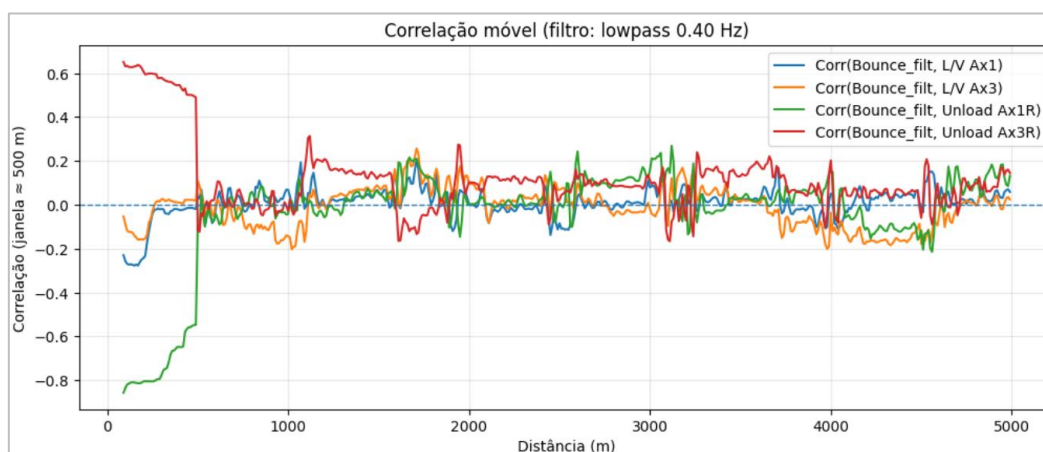


Figura 13. Correlação de Pearson entre bounce e (i) L/V (por eixo). Fonte: Autores (2026).

Por outro lado, no segmento PAS-ZRL, mesmo as janelas com maior pontuação espectral não produziram oscilações verticais representativas nem excedências dos critérios de L/V e alívio de roda entre 64 e 72 km/h. Esse resultado indicou que a proximidade teórica com os comprimentos de onda críticos não é condição suficiente, por si só, para gerar comportamento instável; a amplitude efetiva dos defeitos e a combinação geométrica local da via também precisam ser consideradas. A tabela 6 apresenta um sumário dos resultados obtidos:

Tabela 6. Síntese comparativa dos resultados por corredor.

Campanha/trecho	Cenários	Comportamento de L/V	Comportamento de alívio	Conclusão técnica
TRO-TAG	58 vs 70 km/h	Sem extrapolações relevantes	Amplificação em pontos com defeitos combinados	Necessidade de investigar comprimentos de onda e condição geométrica
TAG-TMI	58 vs 70 km/h	Sem extrapolações relevantes	Aumento pontual associado à geometria	Necessidade de investigar comprimentos de onda e condição geométrica

PPN-POS	58, 64 e 72 km/h	Picos recorrentes acima da referência	Picos acima do critério interno	Não recomendada elevação de velocidade no estado atual
POS-PAS	58, 64 e 72 km/h	Picos recorrentes acima da referência	Picos acima do critério interno	Não recomendada elevação de velocidade no estado atual
PAS-ZRL	58, 64 e 72 km/h	Dentro da referência	Dentro do critério interno	Trecho apto para testes controlados

3.3. Discussão Integrada Entre Dinâmica Vertical E Longitudinal

A contribuição mais relevante da consolidação dos dois estudos é mostrar que a análise de aumento de velocidade para vagões tanque deve ser integrada. A resposta vertical explica diretamente o mecanismo de *roll* e *bounce*, alívio de roda, elevação do L/V, enquanto a resposta longitudinal caracteriza o contexto de carregamento do veículo dentro do trem e fornece uma representação mais fiel da solicitação total percebida nos trechos críticos. Em termos metodológicos, a seleção de *hotspots* por frequência e comprimento de onda tornou a análise mais objetiva e replicável, mas a integração com o FTS permanece fundamental para que a simulação considere o estado real do trem. Assim, a decisão de elevar a velocidade operacional deve ser baseada em três camadas simultâneas: condição geométrica da via, suscetibilidade modal do veículo e solicitação longitudinal do trem.

Esse entendimento também afasta a interpretação de que a viabilidade do aumento de velocidade possa ser expressa por um único valor para toda a malha. Os resultados mostram que há trechos em que a mesma família de vagões tanque apresenta resposta crítica e outros em que o comportamento permanece estável, reforçando a necessidade de uma política de velocidade por corredor e condicionada à manutenção da via.

4. CONCLUSÃO

As análises consolidadas nesse trabalho demonstram que a avaliação do aumento de velocidade de vagões tanque deve combinar, de forma integrada, simulação longitudinal no FTS e simulação multicorpos no VAMPIRE. A utilização de esforços longitudinais como entrada de simulação torna a representação do problema mais aderente à operação real do trem, enquanto a análise modal, a FFT espacial e o ranqueamento de *hotspots* permitem direcionar as simulações para os trechos com maior potencial de excitação crítica.

Nos trechos com deficiência de superelevação e irregularidades combinadas observou-se amplificação da resposta vertical e crescimento do alívio de roda, inviabilizando a elevação da VMA sem intervenção prévia na via. Em contrapartida, segmentos específicos da malha central mostraram comportamento compatível com o avanço para testes controlados em velocidades superiores.

Conclui-se, portanto, que a revisão da VMA para trens tanqueiros deve ser tratada como decisão condicionada por trecho, fundamentada na compatibilidade entre frequências de excitação da via, modos próprios do vagão e estado longitudinal do trem.

5. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: Informação e documentação - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- GARG, V. K.; DUKKIPATI, R. V. Dynamics of Railway Vehicle Systems. Toronto: Academic Press, 1984.
- HUNGRIA, L. H. Segurança Operacional de Trens de Carga. Curitiba: All Print, 2021.
- IKEDA, M.; ESVELT, C. A. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- TYRELL, D. Wheel Unloading of Rail Vehicles Due to Track Twist. Cambridge: Transportation Systems Center, 1986.

EVALUATION OF SPEED INCREASE FOR TANK CARS BASED ON VERTICAL AND LONGITUDINAL DYNAMICS USING VAMPIRE AND FTS

ABSTRACT

This paper presents a methodology to assess speed increases for loaded tank cars by integrating longitudinal train simulation in FTS and multibody vehicle simulation in VAMPIRE. The study consolidates two technical campaigns carried out on Brazilian freight corridors, comparing the current operating speed of 58 km/h with scenarios at 64, 70 and 72 km/h. Longitudinal traction, compression and impact loads computed in FTS were used as inputs for the coupling system model, including drawgear and draft gear behavior. On the vertical side, the analysis focused on bounce and pitch response, L/V ratio, wheel unloading and the coincidence between the vehicle natural frequencies and critical track wavelengths. The methodology evolved from an empirical selection of critical sections to a workflow based on eigenvalues, spatial FFT and excitation hotspot ranking. Results show that speed increase decisions cannot be generalized for the whole network: sections with superelevation deficiency and combined irregularities exhibited amplified vertical response and higher wheel unloading, whereas specific central network segments remained within acceptance criteria and may proceed to controlled tests. The paper concludes that tank car speed revision must be corridor-based and conditioned by track geometry quality, modal compatibility and longitudinal train loading.

Keywords: Tank car; VAMPIRE; FTS; Vehicle dynamics; Operating speed.