



ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DE VAGÃO FERROVIÁRIO EQUIPADO COM EIXOS TUBULARES

Denilson Grando¹; Felipe A. Pauli²; Ronaldo Antunes³

¹Multitech Engenharia — Brasil

²Multitech Engenharia — Brasil

³Vallourec — Brasil

RESUMO

Este artigo apresenta a avaliação do desempenho dinâmico comparativo de um vagão tipo *hopper* operando com eixos ferroviários maciços tradicionais e eixo tubular de nova tecnologia. O objetivo principal é verificar se a substituição dos eixos sólidos por modelos tubulares, que proporcionam uma redução de até 1 tonelada na tara do vagão, compromete a segurança e estabilidade operacional. A metodologia consiste na aplicação da técnica de modelagem e simulação de multicorpos na ferramenta VI-Rail, incorporando também a flexibilidade estrutural dos eixos estimada via análise de elementos finitos (FEA) no software Abaqus. Foram realizadas 165 simulações computacionais baseadas nos requisitos da norma AAR Seção C, Parte II, Capítulo XI, abrangendo cenários de via com e sem irregularidades (*Unperturbed* e *Perturbed Track*). Os resultados demonstram que o comportamento dinâmico do vagão equipado com eixos tubulares é similar ao modelo com eixos maciços, mantendo as tendências de estabilidade e segurança de tráfego em todas as condições avaliadas. Como conclusão, os atributos de segurança e estabilidade com o eixo tubular foram mantidos, demonstrando ser uma solução tecnicamente viável para o aumento da carga líquida transportada sem prejuízo ao desempenho dinâmico do material rodante.

Palavras-chave: *Eixo Tubular, Dinâmica Multicorpos, MBS, FEA.*

1. INTRODUÇÃO

A constante busca pela maximização da eficiência no transporte ferroviário de cargas tem impulsionado inovações focadas na redução da tara dos vagões, estratégia fundamental para o aumento da capacidade de carga útil. Alinhada a essa demanda, a adoção do eixo ferroviário tubular surge como uma solução tecnológica promissora. Já validado em testes mecânicos de laboratório e de campo que atestam uma vida útil superior a 25 anos, este componente proporciona uma significativa redução de até 250 kg por eixo, o que se traduz em um ganho direto de 1 tonelada de capacidade transportada por vagão frente ao modelo maciço convencional (VALLOUREC, 2023).

Contudo, para assegurar a viabilidade operacional dessa inovação, é imprescindível comprovar que as alterações inerentes à redução da massa não suspensa e à nova rigidez estrutural não afetam negativamente a estabilidade e a segurança dinâmica do veículo. Nesse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar comparativamente o comportamento dinâmico de um vagão típico da operação equipado tanto com eixos maciços quanto com os novos eixos tubulares. A investigação foi conduzida por meio de modelagem e simulação computacional de sistemas multicorpos (MBS), baseando-se estritamente nos métodos e critérios de aprovação exigidos pela Section C - Part II, Chapter XI da norma AAR (AAR, 2023).

2. DESENVOLVIMENTO

A metodologia adotada para esse estudo utilizou da aplicação da modelagem estrutural dos eixos (FEA) e da simulação dinâmica do vagão em sistemas multicorpos (MBS), integrando as duas ferramentas no ambiente de simulação MBS (GRANDO, 2012). O desenvolvimento do trabalho foi dividido em 4 etapas, conforme o plano ilustrado na Tabela 1 (MULTITTECH ENGENHARIA, 2025):

Tabela 1 - Descrição das Etapas de Trabalho

Etapa	Descrição
1 Modelagem FEM	Preparação da geometria, malha, propriedades inerciais e análise modal dos eixos.
2 Geração de Arquivo Flexível	Condensação modal (método Craig-Bampton) para exportação ao ambiente MBS.
3 Modelagem Multicorpos	Modelagem de um vagão típico operacional, com truques <i>Ride Control</i> , inclusão dos eixos flexíveis e ajuste de inércia da carga útil.
4 Simulações Dinâmicas	Execução de 165 simulações computacionais em vias padronizadas segundo a norma AAR Cap. XI.

2.1. Modelagem FEM e Propriedades dos Eixos

Os modelos dos rodeiros foram discretizados no software Abaqus utilizando elementos hexaédricos de primeira ordem (C3D8R). O material adotado foi aço estrutural operando em regime elástico. As condições de contorno foram aplicadas para determinar as rigidezes flexural e torcional globais de ambas as configurações, onde podem ser vistas na Figura 1.

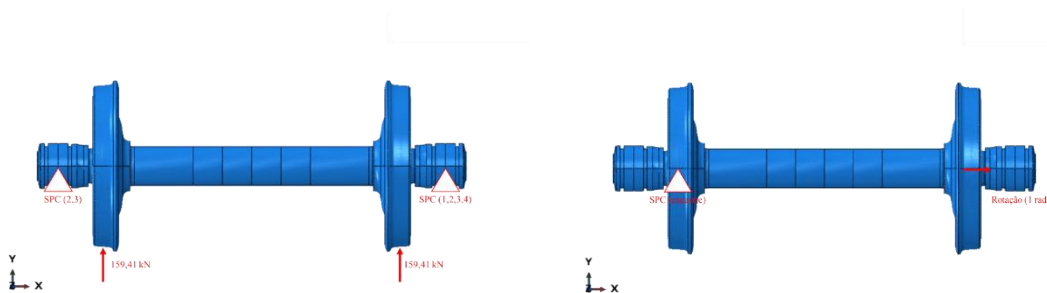


Figura 1 - Condições de contorno aplicada para rigidez flexural e torcional

A análise das propriedades inerciais revelou que o eixo tubular possui um momento de inércia de área (I) 43,3% maior e uma redução de massa de 12,6% no rodeiro montado, favorecendo a razão entre rigidez e massa. A análise modal em condição livre-livre evidenciou que os rodeiros equipados com eixo tubular apresentam um aumento de 11,5% na frequência natural para o primeiro modo de flexão (de 83,45 Hz no maciço para 93,05 Hz no tubular), apresentado na Figura 2, e 11,7% no modo de torção. Adicionalmente, a rigidez flexural equivalente do rodeiro tubular foi 21,5% maior, e a rigidez torcional equivalente apresentou acréscimo de 20,3%.

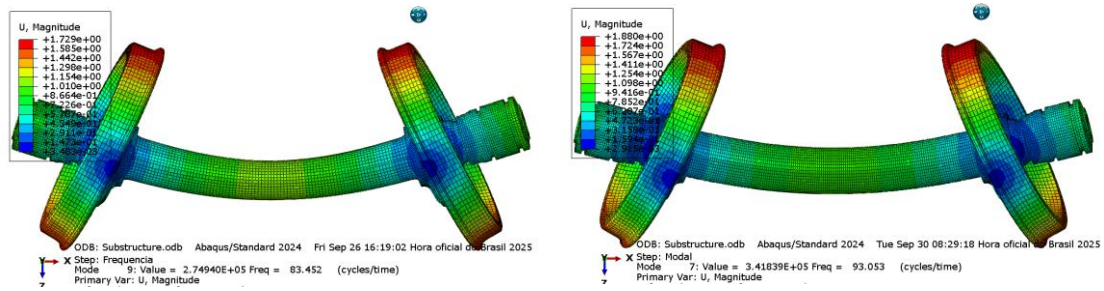


Figura 2 – Modo de flexão eixo maciço (esq.) e eixo tubular (dir.)

Em função dos valores obtidos nas avaliações anteriores, os modelos dos rodeiros foram condensados utilizando o método de Craig-Bampton (CRAIG; BAMPTON, 1968) com normalização em massa, retendo os graus de liberdade de interface nos mancais para a geração do corpo flexível (*.MNF), o qual foi incorporado ao modelo MBS.

2.2. Modelo de Vagão em Sistemas Multicorpos (MBS)

O modelo multicorpos foi elaborado na ferramenta de simulação dinâmica VI-Rail. O veículo base é um vagão tipo *hopper* equipado com dois truques fundidos de 3 peças. O perfil de roda adotado foi o AAR 2A NF em contato com o trilho TR-68. Para garantir uma base de comparação justa, a redução no peso da tara proporcionada pelo eixo tubular foi compensada pelo aumento proporcional da carga útil, mantendo o peso bruto máximo do vagão em 130.000 kg para os cenários em condição carregada. As alterações realizadas neste modelo foram restringidas aos itens abaixo e ilustrados na Figura 3, como uma forma de manter a base do modelo sem nenhuma outra alteração de entrada.

- **Maciço:** Todos os quatro eixos maciços (base de referência);
- **Rodeiro Tubular:** Apenas o rodeiro de ataque do truque dianteiro é tubular;
- **Truque Tubular:** Truque dianteiro possui eixos tubulares;
- **Tubular:** Todos os quatro eixos são tubulares.



Figura 3 - Configurações de eixo avaliadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Avaliação Modal do Vagão

A análise modal foi conduzida para identificar as frequências naturais dos principais modos de vibrar de corpo rígido do vagão em estudo, compreendendo os modos de *Lower Sway* (Rolagem Centro Baixo), *Bounce* (Vertical), *Yaw* (Guinada), *Pitch* (Arfagem) e *Upper Sway* (Rolagem Centro Alto) para o vagão na condição carregado. O objetivo foi avaliar o impacto das variações de inércia e da pequena elevação do centro de gravidade ocasionadas pelo aumento da carga, ajuste feito para compensar a redução da tara propiciada pelo eixo tubular.

Os resultados computacionais demonstraram que as frequências permaneceram praticamente inalteradas em todas as quatro configurações avaliadas. As alterações nas frequências observadas entre a configuração 100% Maciça e a configuração 100% Tubular foi de 3,71 Hz para 3,70 Hz em *Pitch*, e de 3,40 Hz para 3,39 Hz em *Upper Sway*. No modo *Lower Sway*, a frequência foi de 0,85 Hz para a configuração maciça e 0,84 Hz para a configuração totalmente tubular. A *Tabela 2* resume os resultados obtidos.

Tabela 2 – Resultados da Análise Modal

Modo	Frequência (Hz)			
	Maciço	Rodeiro Tubular	Truque Tubular	Tubular
<i>Lower Sway</i>	0.85	0.85	0.85	0.84
<i>Bounce</i>	2.51	2.51	2.51	2.51
<i>Yaw</i>	2.49	2.49	2.49	2.49
<i>Pitch</i>	3.71	3.71	3.70	3.70
<i>Upper Sway</i>	3.40	3.40	3.40	3.39

3.2. Desempenho Dinâmico (MBS) – Norma AAR

Ao todo, 165 simulações computacionais foram realizadas abrangendo cenários de vias sem perturbações induzidas (*Unperturbed Track*), as quais podem ser vistas nas subseções 3.2.1, 3.2.2, e com perturbações (*Perturbed Track*), apresentadas na subseção 3.2.3.

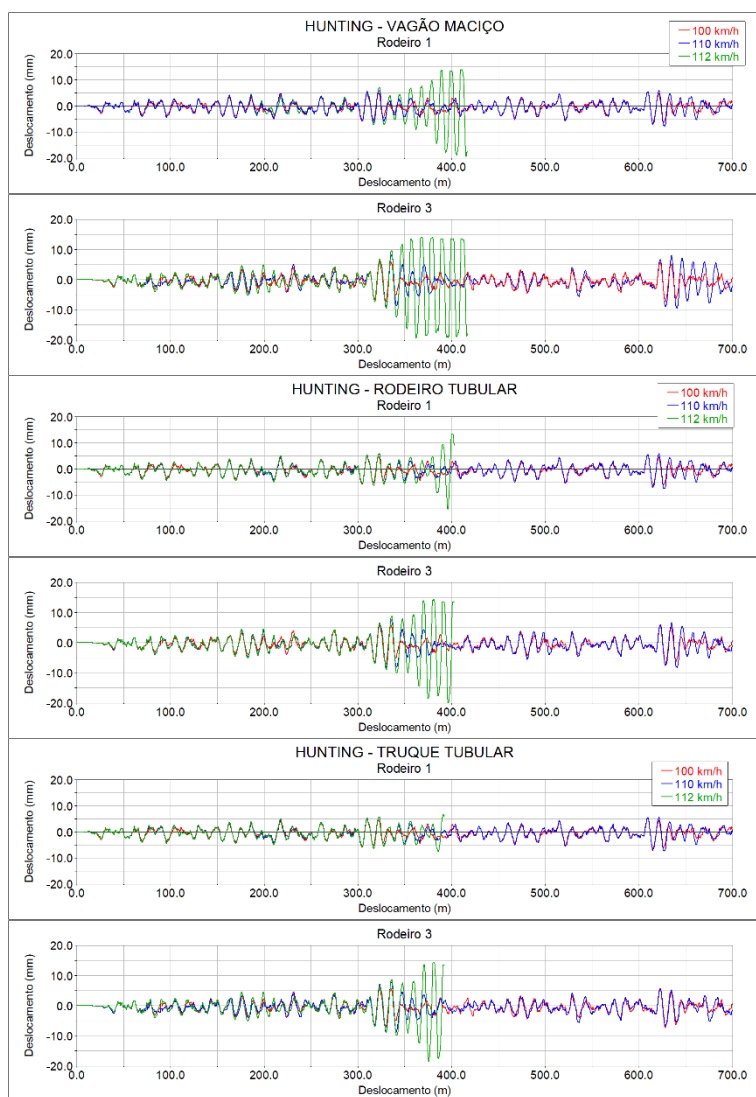
Nas avaliações do tipo *Unperturbed Track*, eventos de *Hunting*, *Constant Curve* e *Spiral*, foram inseridas irregularidades aleatórias mínimas, padrão FRA5. Essas irregularidades foram obtidas sinteticamente através da densidade espectral de potência (PSD). O processo utiliza a transformada inversa de Fourier para converter o espectro de frequências espaciais em uma curva no domínio do espaço, permitindo representar processos aleatórios contínuos e estacionários (HAMID et al., 1983).

Já nas avaliações nas vias do tipo *Perturbed Track*, as geometrias das irregularidades com perfil determinístico são padronizadas e utilizam funções para gerar

irregularidades que excitam modos de vibração específicos do veículo. Essas representações são fundamentais para validar o comportamento de vagões frente a defeitos críticos isolados, como desnivelamentos ou desalinhamentos. A função seno foi aplicada na simulação do evento de *Yaw and Sway*. Este cenário exige a aplicação de perturbações laterais senoidais que oscilam em relação à linha de centro da via. A função do tipo *cusp* é o modelo padrão para simular depressões localizadas na via, geralmente causadas por juntas de trilhos ineficientes ou degradação do lastro e foram utilizadas para os demais eventos de *Pitch and Bounce*, *Twist and Roll* e *Dynamic Curving*.

3.2.1. Hunting (Estabilidade)

O fenômeno de *hunting* (passeio lateral sustentado) foi avaliado com o vagão vazio. O critério AAR exige que o vagão seja estável até 112 km/h. As configurações Maciço, Rodeiro Tubular e Truque Tubular apresentaram velocidade crítica no limite de 112 km/h, enquanto a configuração 100% Tubular se mostrou levemente superior, atingindo instabilidade apenas a 114 km/h. Todas as configurações estão amplamente seguras para a velocidade máxima operacional da ferrovia típica, que é de 80 km/h. A Figura 4 apresenta o passeio lateral do rodeiro 1 e rodeiro 3 para as configurações avaliadas.



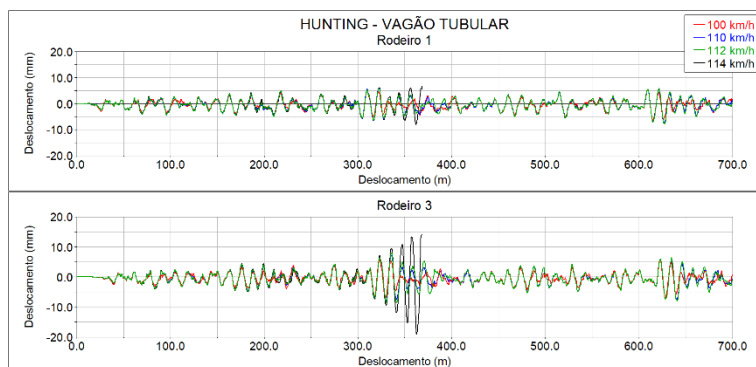


Figura 4 - Velocidade crítica encontrada para as quatro configurações avaliadas.

3.2.2. Inscrição em Curvas (*Constant Curving* e *Spiral*)

Nas análises de raio constante (15°) e espiral de transição (14°), os índices de segurança L/V nas rodas (limite < 1,0) e nos rodeiros (limite < 1,5) permaneceram abaixo dos limites normativos. As diferenças entre as configurações foram irrisórias. No evento *Constant Curving* (vazio), o L/V máximo na roda foi de 0,59 para o eixo maciço e 0,60 para o tubular, conforme ilustrado na Figura 5. Para o vento *Spiral* o L/V máximo foi de 0,76 para o eixo maciço e 0,77 para o tubular, conforme ilustrado na Figura 6.

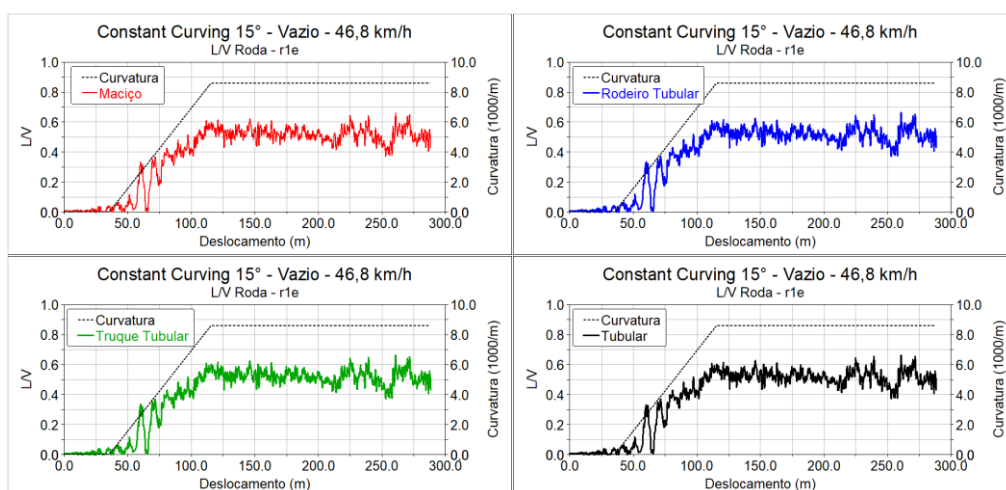


Figura 5 - Maior L/V por roda encontrado no evento Constant Curving

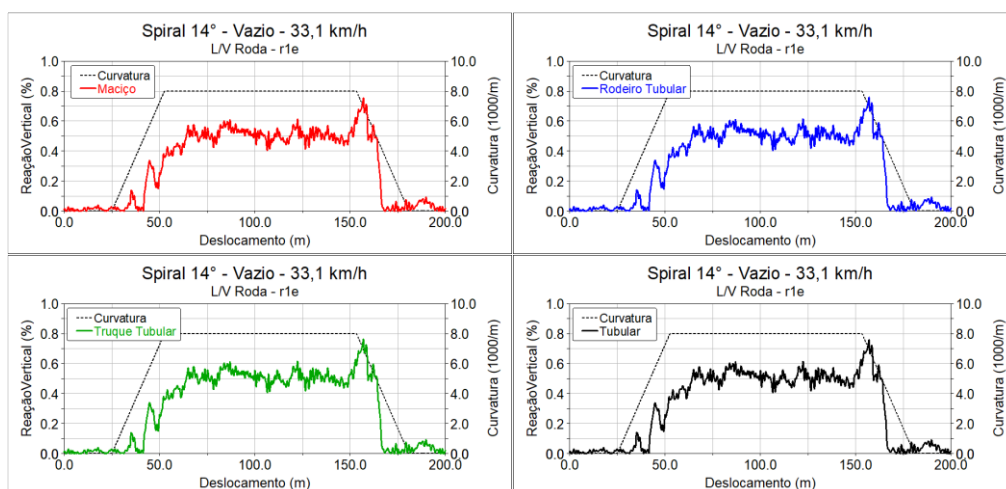


Figura 6 - Maior L/V por roda encontrado no evento Spiral

3.2.3. Perturbed Track

Estes eventos simulam irregularidades geométricas padronizadas na via (desnívelamentos longitudinais, transversais e desalinhamentos) com irregularidades do tipo periódicas padronizadas e destinadas a excitar os principais modos de vibrar de corpo rígido do vagão, em especial os de massa suspensa.

- Em **Pitch and Bounce**, o comportamento do vagão é avaliado quando submetido à irregularidades periódicas de desnívelamento longitudinal na via (comprimento de onda de aproximadamente 12 metros e amplitude de 19 mm), com o intuito de excitar os modos de *pitch* e *bounce* da massa suspensa. Realizada exclusivamente para a condição de vagão carregado, a simulação demonstrou que todas as métricas de segurança — mínima reação vertical nas rodas, máxima aceleração vertical na caixa e máxima carga nas molas — mantiveram-se abaixo dos limites normativos em toda a varredura de velocidade (de 20 a 80 km/h), conforme pode ser observado na Figura 7. A variação de resposta entre o modelo com eixos maciços e as configurações tubulares foi considerada mínima. A maior diferença constatada foi de apenas 0,8% na carga máxima aplicada nas molas da suspensão, registrando 69,5% no vagão convencional contra 70,0% na configuração totalmente tubular. Esse leve acréscimo é uma consequência direta do aumento planejado da carga útil (massa suspensa) para compensar a tara reduzida propiciada pelos eixos tubulares.

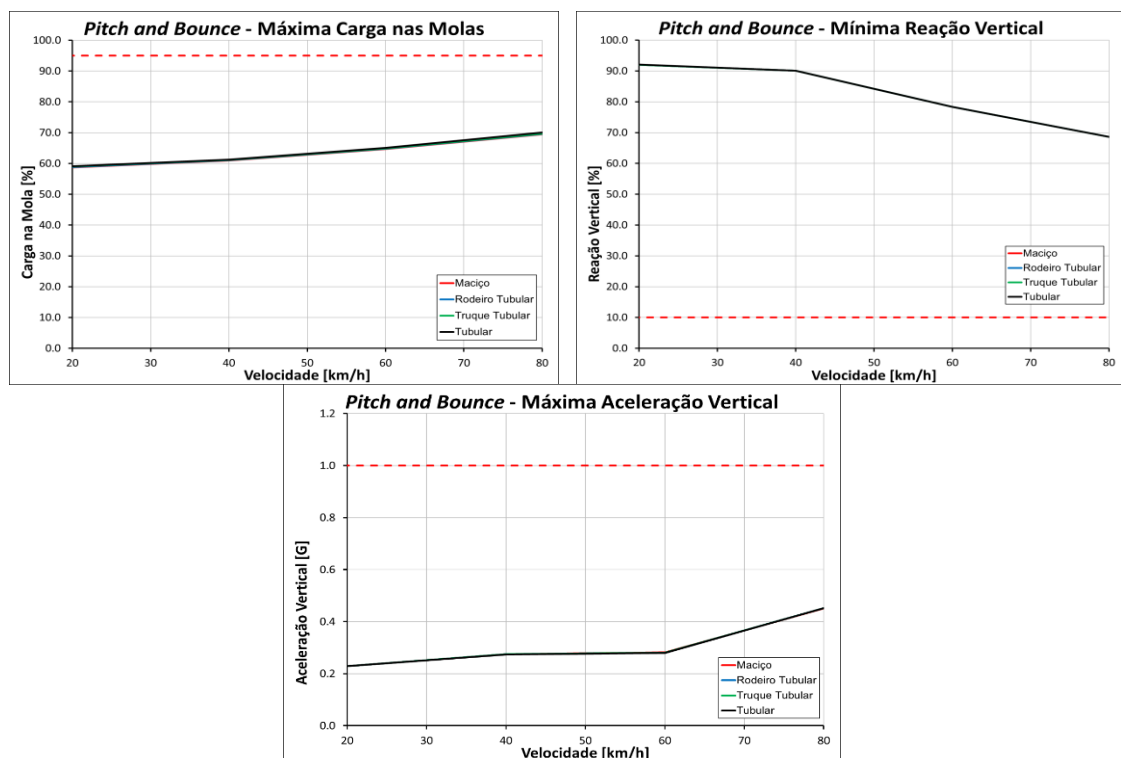


Figura 7 – *Pitch & Bounce* - Gráficos dos resultados das três métricas principais do evento Pitch and Bounce

- Em ***Yaw and Sway***, o vagão carregado é avaliado na transposição de 5 irregularidades periódicas de desalinhamento longitudinal com comprimento de onda de aproximadamente 12 metros e amplitude de 32 mm. Os resultados mostraram a amplificação das métricas em função do aumento da velocidade operacional, atingindo as maiores amplitudes a 80 km/h. O índice máximo de L/V no rodeiro registrado foi de 1,04 para a configuração com rodeiro tubular e 1,03 para a configuração com eixo maciço, mantendo-se significativamente abaixo do limite normativo de 1,5, conforme apresentado na Figura 8. A métrica de L/V lateral do truque chegou a atingir picos de 0,80, ultrapassando o valor de referência de 0,6; contudo, esse pico ocorreu por uma distância inferior a 6 pés, enquadrando-se perfeitamente na regra de exceção permitida pela norma AAR, conforme pode ser visto na Figura 9. Em suma, todas as configurações apresentaram o mesmo nível de desempenho dinâmico e segurança.

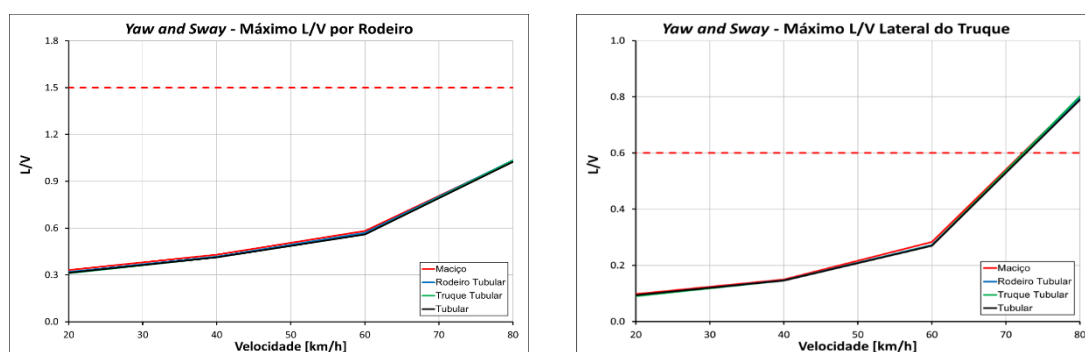


Figura 8 - Yaw & Sway - Gráficos dos resultados do índice L/V por rodeiro e truque.

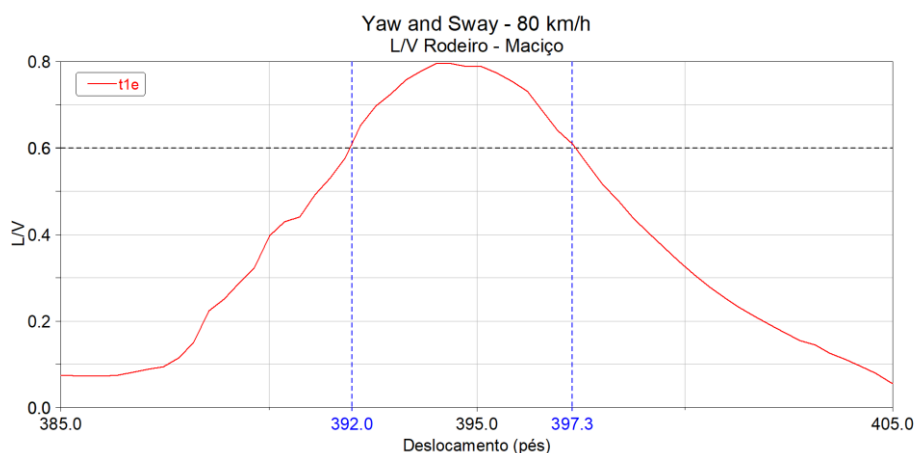


Figura 9 –Exemplo de exceção do máximo L/V lateral do truque - Maciço

- Em ***Twist and Roll***, o comportamento do vagão é avaliado sob irregularidades periódicas de desnivelamento transversal da via (*cross-level*) com comprimento de onda de aproximadamente 12 metros e amplitude de 19 mm). Na condição de vagão carregado, os valores de todas as métricas permaneceram dentro dos limites normativos, apresentando uma amplificação progressiva com o aumento da velocidade. Na condição de vagão vazio, notou-se uma amplificação significativa das respostas na velocidade de 40 km/h, reflexo da excitação do balanço lateral da caixa sobre o prato-pião, conforme mostrado na Figura 10. Nessa velocidade específica, o ângulo de rolagem e a mínima reação vertical superaram os valores

referenciais, porém, enquadraram-se perfeitamente na regra de exceção da norma AAR (duração de pico inferior a 50 milissegundos), justificando a não ocorrência de descarrilamento na simulação. A Figura 11 ilustra o intervalo de ocorrência. O desempenho do modelo tubular acompanhou de forma muito similar as respostas do modelo maciço, não apresentando divergências de comportamento que indicassem insegurança.

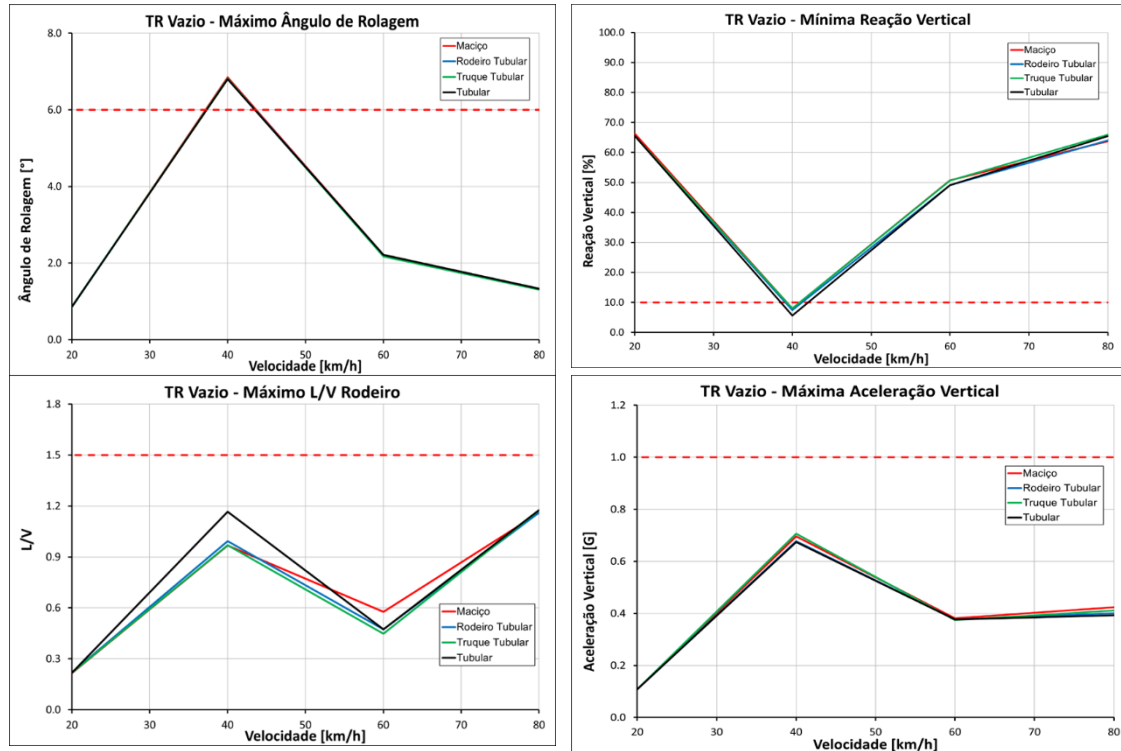


Figura 10 – *Twist & Roll* - Resultados das métricas principais na condição de vagão vazio.

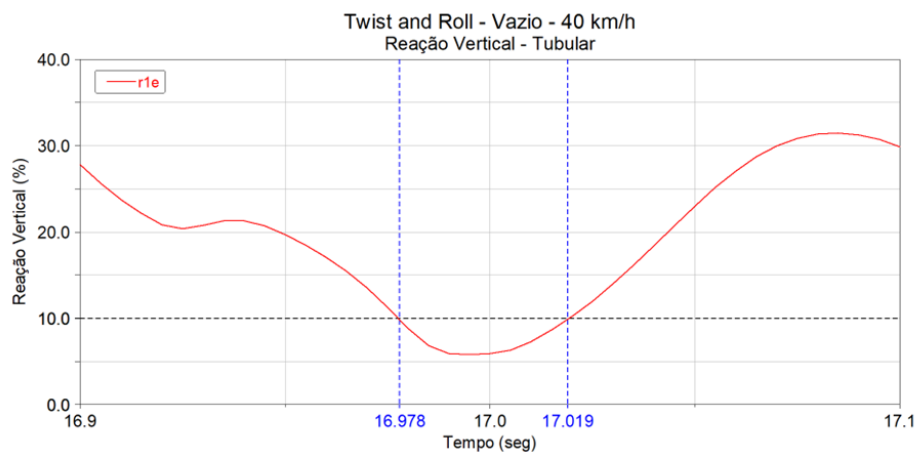


Figura 11 – *Twist & Roll* - Exemplo de exceção da mínima reação vertical - Tubular

- Em **Dynamic Curving**, a capacidade de proporcionar segurança do vagão é investigada em um caso severo de curva (10°) combinada com 5 irregularidades de desnivelamento transversal com comprimento de 12 m e 19 mm, associada à cinco irregularidades de desalinhamento lateral no trilho externo com amplitude de 13 mm. Para o vagão carregado, todas as métricas (como mínima reação vertical e ângulo de rolagem) atenderam aos critérios da norma, apresentando picos mais intensos nas menores velocidades (23,8 km/h) devido à maior excitação do movimento de rolagem, conforme apresentado na Figura 12. No cenário vazio, devido à falta de massa para estabilizar o vagão contra os impactos severos causados pelo desalinhamento da via, as métricas de L/V (roda e rodeiro) ultrapassaram nominalmente os limites referenciais para velocidades acima de 40,3 km/h. Mais uma vez, essas exceções caracterizaram impactos de curta duração do flange da roda, conforme Figura 13, e respeitaram a tolerância exigida de tempo inferior a 50 milissegundos, atestando a segurança da transposição. Para toda a faixa de velocidade analisada, as configurações com eixo tubular não apenas apresentaram a mesma tendência dinâmica do vagão convencional, como suas curvas de resultados mostraram-se virtualmente idênticas.

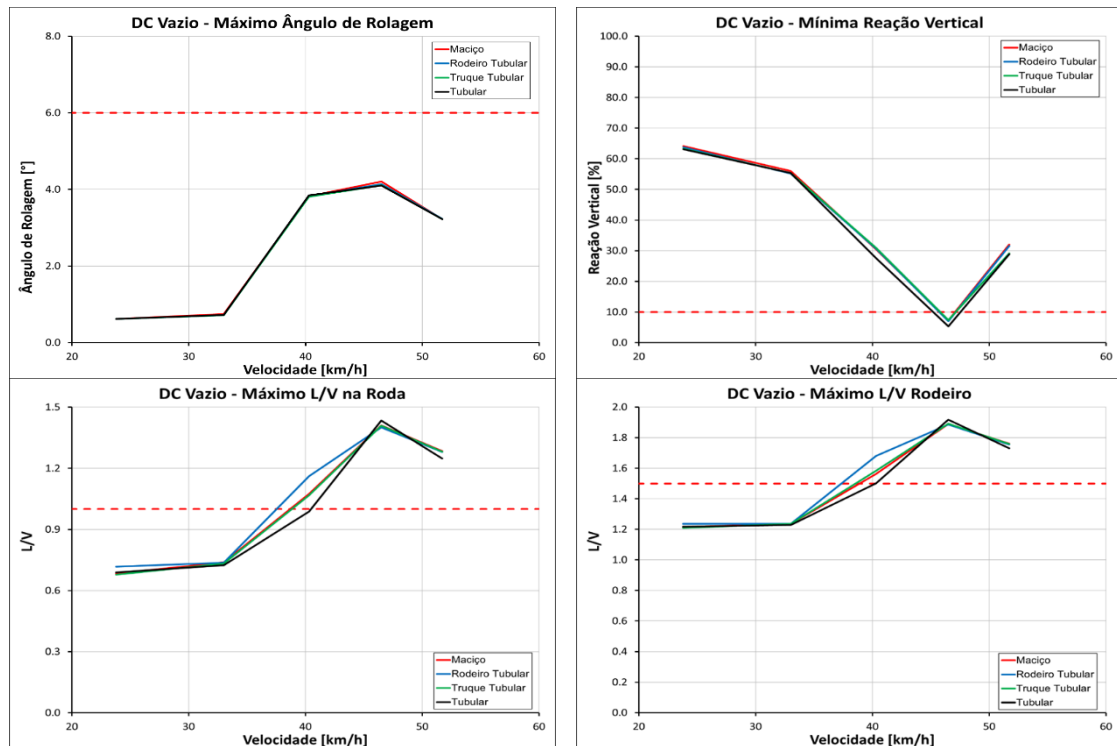


Figura 12 – *Dynamic Curving* - Resultados das métricas principais na condição de vagão vazio.

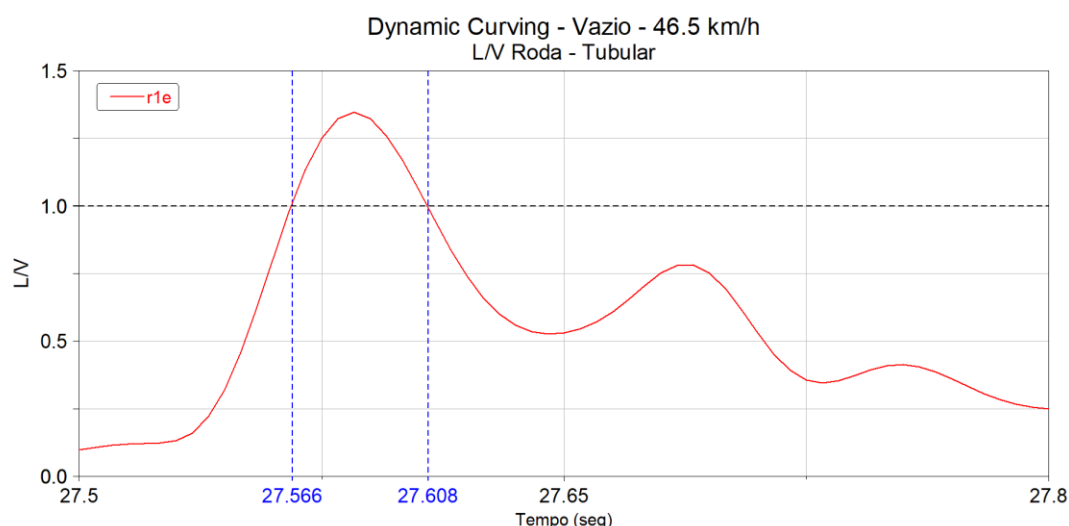


Figura 13 - Exemplo de exceção do máximo L/V na roda - Tubular

4. CONCLUSÃO

A integração entre a modelagem por elementos finitos e a simulação de sistemas multicorpos demonstrou ser uma abordagem metodológica robusta e eficaz para a validação de inovações tecnológicas no setor ferroviário. Sob a ótica estrutural, o eixo tubular comprovou sua eficiência ao apresentar um incremento de aproximadamente 20% nas rigidezes flexural e torcional, além de frequências naturais mais elevadas em comparação ao eixo maciço. Esse arranjo otimizado viabiliza a redução da tara do vagão, favorecendo a relação entre resistência e massa.

No que tange o comportamento dinâmico, as extensas simulações conduzidas sob os rigorosos critérios do Capítulo XI da norma AAR atestaram que o vagão típico equipado com eixos tubulares possui desempenho similar ao do vagão com eixos convencionais. Em termos de estabilidade, a velocidade crítica para *hunting* ficou marginalmente superior. Em todos os cenários de vias com e sem irregularidades, as métricas de segurança contra descarrilamento, estabilidade e capacidade de inscrição em curvas permaneceram estritamente dentro das tolerâncias normativas, não apresentando divergências que representassem risco à operação.

Portanto, a adoção da tecnologia de eixos tubulares é uma solução tecnicamente viável e vantajosa do ponto de vista das métricas dinâmicas aqui avaliadas. O componente atende à demanda por maior eficiência e capacidade de carga no transporte ferroviário, sem concessão à segurança e à integridade dinâmica da composição. Como desdobramento natural desta pesquisa, recomenda-se a execução de testes de campo em malha operacional, utilizando vagões devidamente instrumentados, para a validação experimental e corroboração dos dados observados nas avaliações numéricas.

6. REFERÊNCIAS

VALLOUREC. **Railway Axle: Brochure**. [S. l.]: Vallourec, out. 2023. Disponível em: https://www.vallourec.com/app/uploads/sites/2/2023/10/Railway-Axle_brochure.pdf. Acesso em: 15 mai. 2024.

ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (AAR). **Manual of Standards and Recommended Practices: Section C - Part II, Chapter XI: Design, Fabrication, and Construction of Freight Cars**. Washington, D.C.: AAR, 2023.

GRANDO, D. **Modelagem de vagão ferroviário em sistema multicorpos e avaliação do comportamento dinâmico em via tangente com desnivelamento transversal periódico**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

HAMID, A. et al. **A methodology for characterization of track geometric irregularities**. Washington, D.C.: Federal Railroad Administration, 1983. Report No. FRA/ORD-83/15.

MULTITTECH ENGENHARIA. **Relatório Técnico Interno OP-033051: Estudo dinâmico comparativo de vagão com eixo tubular**. Holambra, 2025.

CRAIG, R. R.; BAMPTON, M. C. C. Coupling of substructures for dynamic analyses. **AIAA Journal**, v. 6, n. 7, p. 1313-1319, 1968.

DYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF A RAILWAY WAGON EQUIPPED WITH TUBULAR AXLES

ABSTRACT

This article presents a comparative dynamic performance evaluation of a hopper wagon operating with traditional solid railway axles and new technology tubular axles. The primary objective is to verify whether replacing solid axles with tubular models—which provide a tare weight reduction of up to 1 tonne—compromises operational safety and stability. The methodology consists of applying multi-body modeling and simulation techniques using the VI-Rail tool, also incorporating the structural flexibility of the axles estimated via Finite Element Analysis (FEA) in Abaqus software. A total of 165 computational simulations were performed based on the requirements of the AAR Section C, Part II, Chapter XI standard, covering track scenarios with and without irregularities (Unperturbed and Perturbed Track). The results demonstrate that the dynamic behavior of the wagon equipped with tubular axles is similar to the model with solid axles, maintaining stability and traffic safety trends across all evaluated conditions. In conclusion, the safety and stability attributes were maintained with the tubular axle, proving it to be a technically viable solution for increasing net load capacity without compromising the dynamic performance of the rolling stock.

Keywords: *Tubular Axle, Multi-body Dynamics, MBS, FEA.*