



ANÁLISE DINÂMICA MULTICORPOS EM VIA COM DORMENTES DE CONCRETO E MADEIRA

Welton Carlos Marques¹; João Carlos Serpa²; Lucas de Castro Valente³

¹VLI Logística — Brasil

²VLI Logística — Brasil

³VLI Logística — Brasil

RESUMO

Este estudo investiga a interação dinâmica entre veículo e via em um trecho ferroviário que apresenta alternância entre dormentes de concreto e madeira. A motivação surge de variações geométricas observadas após substituições pontuais de dormentes, que alteram a rigidez vertical da via e podem comprometer o desempenho dinâmico dos vagões. Para avaliar esse efeito, foi empregada simulação multicorpos no software VAMPIRE, utilizando a modelagem de um vagão HFE em condição de limite de manutenção e a geometria real medida pelo veículo de inspeção EM80. A análise considera valores distintos de rigidez (módulo de via) associados aos tipos de dormentes, bem como sua distribuição ao longo da via, permitindo investigar como essas descontinuidades estruturais influenciam a resposta dinâmica do sistema. O estudo busca identificar os mecanismos que favorecem excitações harmônicas, instabilidades veiculares e possíveis condições críticas de alívio de rodas, fornecendo subsídios técnicos para avaliar riscos operacionais e orientar práticas de manutenção. Os resultados obtidos contribuem para o entendimento da relação entre rigidez da via, irregularidades geométricas e comportamento dinâmico, oferecendo bases para decisões de engenharia associadas à estabilidade da via e à confiabilidade operacional do transporte ferroviário.

Palavras-chave: *Dinâmica de via; Módulo de via; Vampire; Dormente de madeira; Dormente de concreto; Alívio de rodas.*

1. INTRODUÇÃO

A roda e o trilho são os elementos fundamentais de um sistema ferroviário. A interação de ambos constitui o sistema roda/trilho, que possui múltiplas funções como garantir o movimento dos veículos dentro dos limites de segurança em curvas e tangentes da via; garantir a aceleração e desaceleração dos veículos; e suportar as cargas dos veículos garantindo a transmissão ao solo. (KNOTHE e STICHEL, 2003).

A transmissão de cargas ao solo está vinculada à capacidade estrutural da via, expressa pelo módulo de via. Esse parâmetro define a rigidez da estrutura ferroviária e quantifica o grau de deformação da via sob a passagem do trem, constituindo um indicador essencial para avaliar o desempenho, a estabilidade geométrica e a segurança operacional do sistema. Em uma das abordagens para determinar o módulo de suporte da via “k”, vários pesquisadores na América do Norte e na Europa assumiram que a base de suporte do trilho, juntamente com as placas de apoio, dormentes, lastro e subleito, pode ser representada por camadas de molas, cada uma com uma rigidez diferente, dispostas em série, como mostrado esquematicamente. (KERR, 2000).

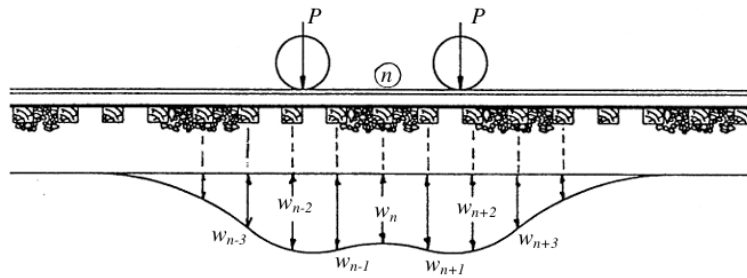


Figura 1. Deformação da via sob a passagem do trem

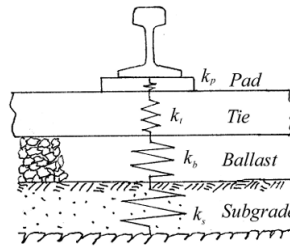


Figura 2. Representação por camadas de molas para rigidez da via

A rigidez da linha está diretamente relacionada às características da via permanente, e dentre os componentes de superestrutura, os dormentes desempenham um papel relevante para esse aspecto. Os dormentes de concreto possuem elevada rigidez, enquanto dormentes de madeira apresentam menor rigidez, permitindo maior absorção das vibrações naturais das rodas e oferecendo comportamento mais flexível em comparação às linhas com dormentes de concreto (STEFFLER, 2013).

A combinação de dormentes de concreto e madeira gera variação de rigidez da via, e essa situação pode ser agravada por um “gap” entre a base do dormente de madeira e o lastro, em função da diferença de altura 0,07m ($\approx 7\text{mm}$) entre o dormente de madeira e concreto. A altura do dormente de concreto é 0,23m e a do dormente de madeira é 0,16m.

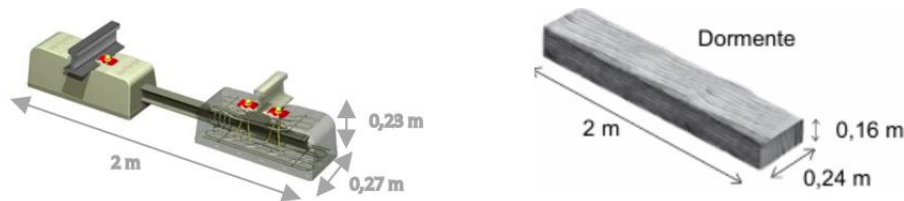


Figura 3. Dimensões dos dormentes de concreto (à esquerda) e dormente de madeira (à direita)

O “gap” gerado entre o dormente de madeira e o lastro compromete a eficiência das intervenções de correção geométrica / socaria.



Figura 4. Diagrama de estrutura ferroviária – superestrutura e infraestrutura e ilustração do “gap” do dormente de madeira em relação ao lastro.



Uma linha com deficiência de socaria apresenta módulo reduzido, tornando a via mais flexível e sujeita a maior deflexão. Essa condição acelera o desgaste dos componentes e exige manutenção frequente, pois compromete a geometria da via, resultando em irregularidades de nivelamento e alinhamento.

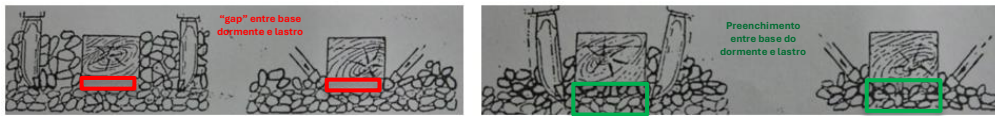


Figura 5. Linha com socaria deficiente (à esquerda) e linha com socaria eficiente (à direita)

Anomalias de geometria, como irregularidades no nivelamento da linha ou problemas na suspensão do vagão, provocam bruscas reduções no componente vertical, aumentando a relação L/V e contribuindo para o alívio das rodas de um lado do vagão. Já os defeitos de alinhamento da via e a torção do truque elevam o esforço lateral, reforçando essa relação e ampliando o risco de instabilidade. Um dos efeitos dinâmicos decorrentes de defeitos de nivelamento é o *Bounce* (Galope), associado à movimentação vertical e, em alguns casos, à oscilação longitudinal do veículo. Esse fenômeno provoca transferência de força vertical entre as rodas, podendo resultar em subida de roda e na formação de curtas marcas de friso. O galope ocorre, em geral, em velocidades superiores a 65 km/h, especialmente em trechos onde há variação da rigidez vertical da via, como em pilares de pontes ou passagens em nível. (STEFFLER, 2013).

Um vagão ferroviário possui seis graus de liberdade, representados por três modos de translação (longitudinal, lateral e vertical) e três modos de rotação (rolagem, arfagem e guinada). A oscilação longitudinal ocorre ao longo do eixo do veículo, enquanto a rolagem corresponde à rotação em torno desse mesmo eixo. A oscilação lateral desenvolve-se ao longo do eixo transversal, enquanto a arfagem descreve a rotação em torno desse eixo. Já a oscilação vertical ocorre ao longo do eixo vertical, e a guinada corresponde à rotação em torno dele. (MAROTTA e VALENTE, 2016):

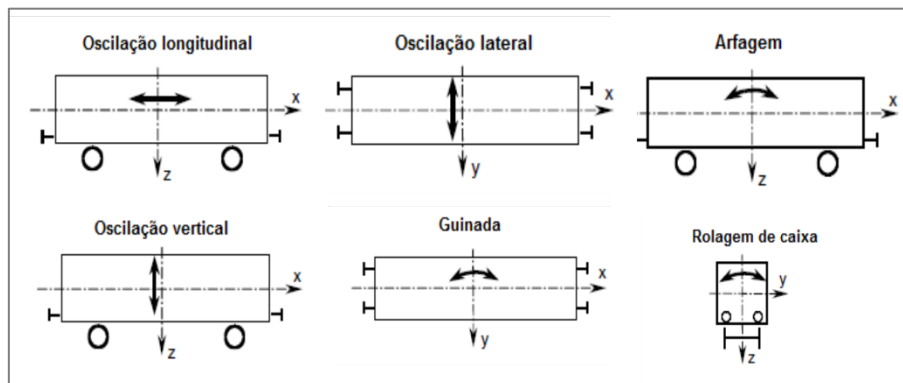


Figura 6. Modos de vibração de um vagão

Veículos ferroviários podem ser excitados por efeitos transientes ou periódicos, ativando diferentes modos de vibração conforme a velocidade de operação, as irregularidades da via e as propriedades de rigidez e amortecimento do sistema. Cada modo possui uma frequência natural determinada pela combinação entre massa, rigidez e amortecimento, conforme estabelecido pela teoria de sistemas vibratórios e pela análise modal. Quando o veículo trafega sobre irregularidades com determinado comprimento de onda, essas imperfeições geram frequências de excitação proporcionais à velocidade, podendo interagir com os modos naturais do vagão. A figura a seguir ilustra essa relação



entre velocidade e comprimento de onda para os principais modos de vibração de um vagão. (MAROTTA e VALENTE, 2016).

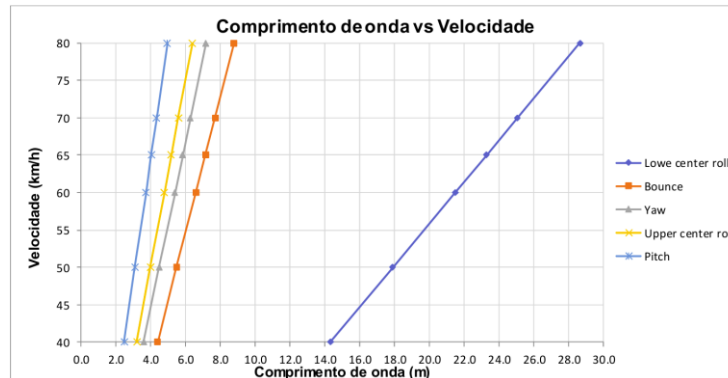


Figura 7. Combinações de velocidade e comprimento de onda para os modos de vibração

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da velocidade de 60 km/h em uma via composta por dormentes de concreto intercalados com dormentes de madeira. A análise, realizada por meio de simulação dinâmica com o software VAMPIRE, examina a interação veículo-via e apresenta os valores de alívio de rodas em diferentes velocidades (40, 50 e 60 km/h).

2. DESENVOLVIMENTO

O trabalho foi desenvolvido com base no método de simulação multicorpos, utilizando a modelagem integrada de um veículo ferroviário, do perfil roda-trilho e da via permanente. Para a representação da via, foram considerados parâmetros de geometria e rigidez vertical, definidos em função das condições estruturais dos dormentes de concreto e de madeira.

2.1. Modelagem do veículo ferroviário – vagão HFE

A modelagem de um veículo ferroviário no software VAMPIRE exige a definição de parâmetros relacionados aos principais componentes – rodas, suspensão, truque e caixa. Entre os parâmetros mais relevantes destacam-se: a massa total, os momentos de inércia em torno dos eixos x (longitudinal), y (transversal) e z (vertical), e a altura do centro de gravidade. (KNOTHE e STICHEL, 2003).

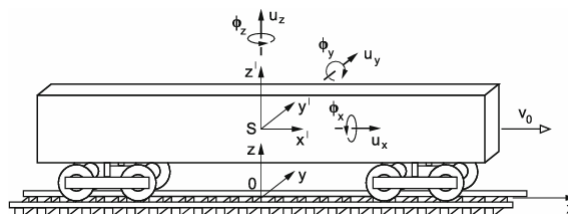


Figura 8. Sistemas de coordenadas; nomenclatura dos movimentos do veículo

O modelo computacional adotado corresponde à caixa de um vagão *hopper* do tipo HFE, carregado com soja. O conjunto é equipado com truque Ride Control 6½×9” e configurado com parâmetros de suspensão representativos de uma condição próxima ao limite de manutenção. Foram considerados: altura das cunhas de fricção de 46 mm (acima do limite de manutenção de 33 mm), ampara-balanço de contato constante de 132 mm (no limite superior da faixa de projeto de 128 a 132 mm) e roda esquerda com *hollow* de



5 mm (superior ao limite de 4 mm estabelecido para desgaste oco). Essa configuração visa reproduzir uma condição operacional crítica, representativa de alguns veículos que operam próximos ao estado real de serviço, aumentando a sensibilidade do modelo às excitações provenientes da via.



Figura 9. Modelo do vagão HFE: caixa, truque, sistema de amortecimento e rodas.

2.2. Modelagem da Via Permanente

A modelagem da via permanente consiste na elaboração dos arquivos de geometria, contato roda/trilho e rigidez de via. A modelagem foi definida a partir dos parâmetros de geometria medidos pelo veículo de inspeção EM80, fabricado pela MERMEC. Esse equipamento fornece dados essenciais para a caracterização geométrica da via, incluindo nivelamento transversal (superelevação), alinhamento, nivelamento longitudinal, bitola e raio de curva, informações fundamentais para a realização de simulações dinâmicas no software VAMPIRE.

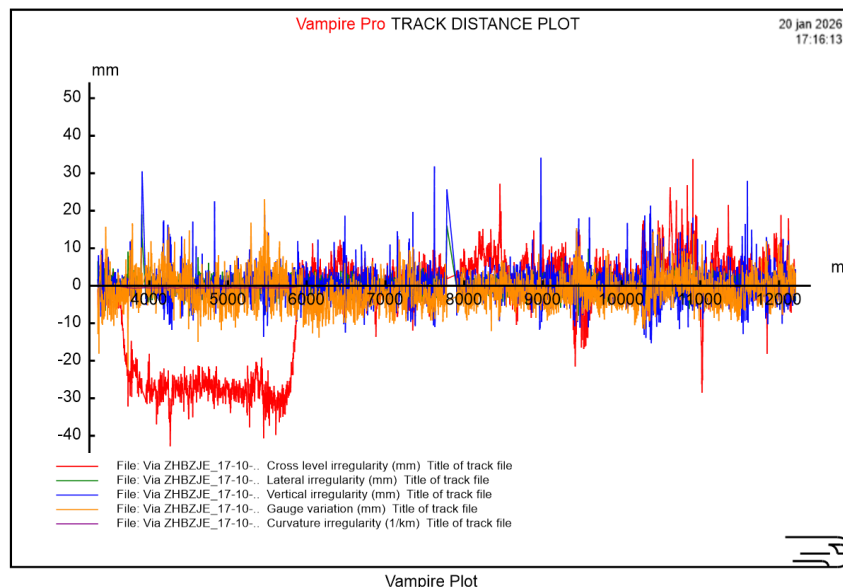


Figura 10. Gráfico do Vampire com os parâmetros de geometria medidos na inspeção do carro controle EM80

Na representação gráfica acima, cada parâmetro de geometria é identificado por uma cor específica: linha vermelha – superelevação (nivelamento transversal); linha verde – alinhamento; linha azul – nivelamento longitudinal; linha amarela – bitola; linha roxa – grau de curvatura.

Os dados de alinhamento e nivelamento longitudinal gerados pelo EM80 são disponibilizados no formato Space Curve, compatíveis com os requisitos de entrada do



VAMPIRE, permitindo uma representação precisa da geometria da via e, consequentemente, uma melhor avaliação do comportamento dinâmico dos veículos ferroviários.

O formato Space Curve apresenta irregularidades em valores absolutos, diferindo das medições por cordas realizadas por outros equipamentos, que fornecem valores relativos (flechas para cordas de 10 ou 20 metros). A geração dos dados nesse formato é viabilizada pelo sistema inercial do EM80, composto por acelerômetros e giroscópios, que realiza dupla integração da aceleração para determinar os deslocamentos ao longo da via. A partir desses deslocamentos, é possível reconstruir a geometria da via no plano cartesiano, obtendo sua configuração real. Alternativamente, essa informação poderia ser obtida por meio de medições topográficas. (MAROTTA e VALENTE, 2012).

Além dos parâmetros de geometria da via, foram configurados os parâmetros de rigidez vertical diferenciada, considerando 41,38 kN para dormentes de concreto e 20,69 kN para dormentes de madeira.

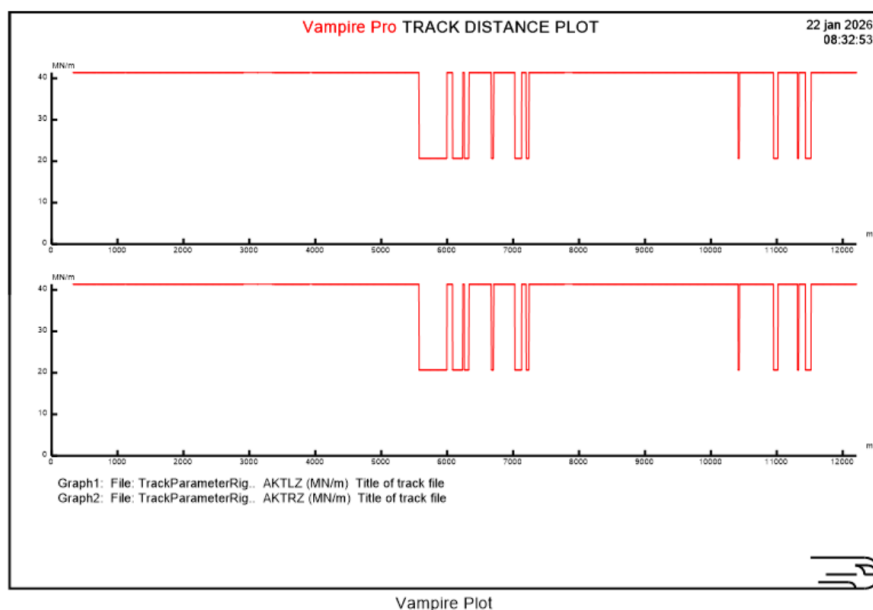


Figura 11. Gráfico do Vampire com os parâmetros de rigidez vertical

O valor típico do módulo da via para trilhos principais com dormentes de concreto é de 41,38 N/mm/mm (6000 lbs./in/in), sendo duas vezes mais rígido que o módulo típico da via com dormentes de madeira, de 20,69 N/mm/mm (3000 lbs./in/in). (LIMA et al., 2020).

2.3. Velocidade da simulação

As simulações foram realizadas nas velocidades de 40, 50 e 60 km/h, com o objetivo de avaliar os resultados do parâmetro de Alívio de Rodas, estabelecido pela *FRA – Federal Railroad Administration* como um dos limites de segurança para comportamento dinâmico. A norma descrita pela FRA define o limite de 85% para o alívio de uma das rodas.

O limite de segurança da interação veículo via relacionado à razão de carga vertical de uma única roda serve para garantir uma margem de segurança adequada para o alívio de carga da roda. A razão expressa em percentual significa o limite de 15% da carga vertical estática da roda. Por exemplo, se a carga estática da roda for 20 kips, a

carga da roda durante o teste deve medir 3 (20 x 15%) kips ou mais para a janela especificada. (FRA, 2018).

Ou seja, a carga dinâmica de cada roda não pode cair abaixo de 15% da carga vertical estática. Em termos práticos, considerando uma roda com 10 toneladas de carga estática, a roda deve manter pelo menos 1,5 toneladas de carga durante o teste, não podendo aliviar mais do que 8,5 toneladas.

Entretanto, neste estudo o limite para o alívio de rodas será de 70%. Pois o peso do veículo de inspeção é inferior ao peso de um vagão carregado. Portanto, adotou-se esse limite como fator de segurança.



Figura 12. Exemplo do alívio das rodas de um veículo ferroviário

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O segmento de via analisado corresponde a uma tangente, condição em que, conforme a literatura técnica, o nivelamento transversal deve permanecer igual a zero, uma vez que não há solicitação lateral decorrente de curvatura e o apoio do veículo sobre os trilhos deve ocorrer de forma simétrica. Essa característica geométrica torna os trechos tangentes, em geral, menos críticos do ponto de vista dinâmico do que as curvas, devido à ausência de componentes laterais de força. Entretanto, a inspeção revelou variações significativas no nivelamento transversal (linha vermelha da figura 13). No caso específico do nivelamento transversal, foi registrado um valor de 33 mm em um trecho tangente, discrepância substancial em relação ao valor esperado – zero ou muito próximo disso – indicando uma condição anormal da via e potencial origem de carregamentos assimétricos indesejados sobre o veículo, pois ambos os trilhos deveriam estar na mesma cota.

Essas variações estão diretamente associadas ao estado de conservação dos dormentes, já que inspeções visuais identificaram a necessidade de substituição de unidades defeituosas. Tal constatação reforça a influência do módulo de via sobre a qualidade da geometria, conforme destacado por Steffler (2013), ao mencionar que a



combinação de dormentes de concreto e madeira pode comprometer a geometria da via, resultando em irregularidades de nivelamento e alinhamento.

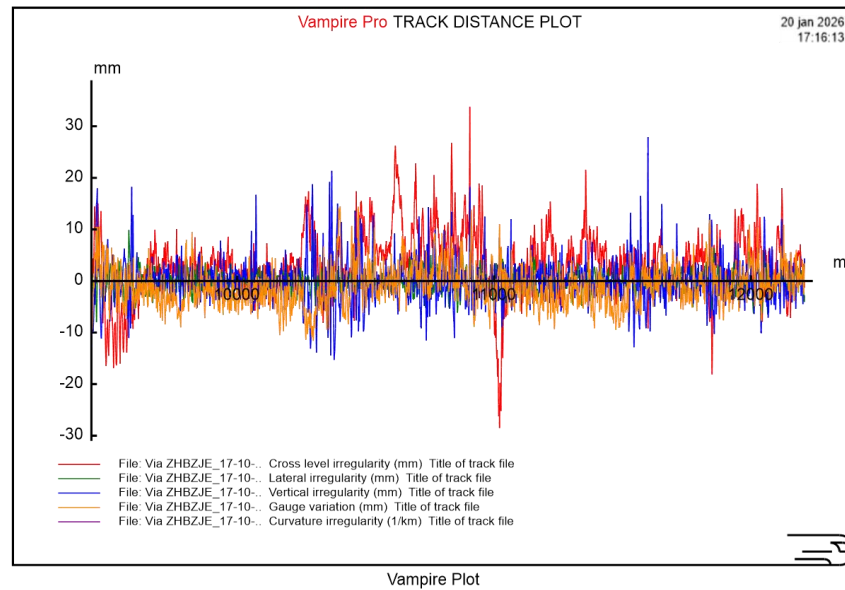


Figura 13. Gráfico do Vampire com os parâmetros de geometria medidos na tangente

A seguir, são apresentados os resultados das simulações dinâmicas realizadas no VAMPIRE para avaliação do comportamento do veículo ferroviário transitando por uma via com dormente de concreto e madeira.

As simulações contemplaram variações de velocidade e de rigidez da via. No caso da rigidez, além da condição variável (41,38 kN para dormentes de concreto e 20,69 kN para dormentes de madeira), foram consideradas duas situações constantes: 10 kN, valor inferior à referência indicada para ambos os tipos de dormentes, e 31 kN, correspondente ao valor médio entre os dois tipos de dormentes.

Tabela 1. Resultados das simulações dinâmicas com valores de alívio de rodas por variação de velocidade e rigidez

Velocidade	Rigidez variável (concreto - 41,38 kN e madeira - 20,69 kN)	Rigidez constante (10 kN)	Rigidez constante (31 kN)
40 km/h	59,4%	42,4%	56,2%
50 km/h	67,3%	52,6%	58,4%
60 km/h	82,7%	69,0%	79,2%



Alívio de Rodas com velocidade de 40 Km/h.

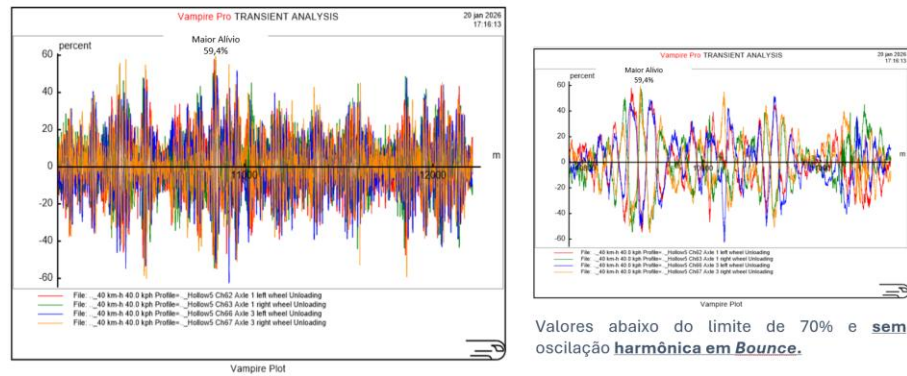


Figura 14. Gráfico do Vampire comparando os resultados do alívio de rodas na simulação com a velocidade de 40 km/h em via com variação de rigidez (dormente de concreto e madeira)

Alívio de Rodas com velocidade de 60 Km/h.

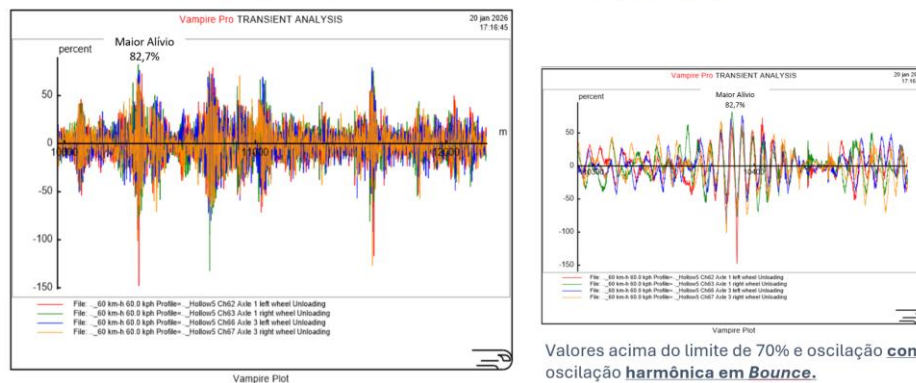


Figura 15. Gráfico do Vampire comparando os resultados do alívio de rodas na simulação com a velocidade de 60 km/h em via com variação de rigidez (dormente de concreto e madeira)

Os resultados das simulações evidenciaram que o aumento da velocidade do veículo ferroviário está diretamente associado a maiores percentuais de alívio das rodas em todos os cenários, confirmando a intensificação dos efeitos dinâmicos e o consequente incremento do risco à segurança operacional. A condição mais crítica foi observada no cenário de rigidez variável (combinação de dormentes de concreto e madeira), que atingiu 82,7% de alívio na velocidade de 60 km/h. Além da magnitude elevada, o sinal de alívio apresentou comportamento harmônico no modo *bounce*, indicando que as excitações provenientes da via estavam atuando de forma coerente com um dos modos naturais do veículo, agravando a instabilidade do sistema.

A amplificação dinâmica está diretamente relacionada ao fenômeno de ressonância, que ocorre quando a frequência de excitação – determinada pela velocidade e pelo comprimento de onda gerado pela via devido suas irregularidades – coincide com uma das frequências naturais do vagão. Nessa condição, as respostas do sistema aumentam significativamente, sobretudo em veículos com baixo amortecimento estrutural. Estudos de dinâmica veicular realizados na MRS Logística demonstram essa relação ao identificar que modos como *sway* (oscilação lateral), *bounce* (galope), *yaw* (guinada) e *pitch* (arfagem) são particularmente sensíveis a imperfeições de nivelamento transversal e à velocidade, favorecendo o surgimento de excitações harmônicas e



instabilidades laterais em determinadas combinações de via e condições de desgaste do material rodante. (MAROTTA e VALENTE, 2016).

A influência dos defeitos de nivelamento torna-se ainda mais relevante em segmentos tangentes, onde a ausência de forças laterais oriundas de curvatura reduz a capacidade natural de estabilização do vagão. Nessas condições, movimentos harmônicos podem evoluir sem oposição significativa, especialmente quando o trem opera sem tração ou frenagem, condição que reduz o confinamento longitudinal do engate e facilita a amplificação de oscilações. (STEFFLER, 2013).

Nesse contexto, destaca-se que, em todas as velocidades analisadas, os maiores valores de alívio ocorreram na condição de rigidez variável, reforçando sua maior suscetibilidade a irregularidades geométricas e ao comprometimento da estabilidade da via. Evidências históricas de instalações intercaladas de dormentes de concreto e madeira na América do Norte também apontam para desempenho insatisfatório desse arranjo, em grande parte devido à diferença de rigidez entre os dormentes. Estudos teóricos demonstram que esse tipo de combinação pode gerar forças na base do trilho mais de cinco vezes superiores às que atuam sobre dormentes de madeira adjacentes, intensificando os esforços transmitidos ao veículo e à via. (LIMA et al., 2020).

Conforme discutido na introdução, vias com menor deflexão – ou seja, de maior rigidez – tendem a proporcionar melhor estabilidade dinâmica aos veículos ferroviários, desde que mantidas em adequado estado geométrico. Entretanto, devido à deficiência de nivelamento transversal identificada na inspeção do carro controle no segmento analisado, as simulações com rigidez constante de 31 kN apresentaram valores de alívio de rodas superiores aos observados para a rigidez de 10 kN. Esse comportamento ocorre porque, em vias mais rígidas, defeitos de geometria não são absorvidos pela superestrutura, sendo transmitidos de forma mais intensa ao veículo, especialmente em velocidades elevadas. Como consequência, o alívio de rodas atingiu 79,2% a 60 km/h. Ainda assim, esse valor foi inferior ao observado no cenário com variação de rigidez decorrente da combinação de dormentes de madeira e concreto, no qual o alívio de rodas atingiu 82,7% a 60 km/h, indicando que descontinuidades estruturais ao longo da via podem intensificar os efeitos dinâmicos.

4. CONCLUSÃO

Este estudo analisou um trecho de via férrea composto por dormentes de concreto intercalados com dormentes de madeira, avaliando a influência da variação de rigidez e da velocidade no comportamento dinâmico dos veículos ferroviários. As simulações realizadas no software VAMPIRE demonstraram que a diferença de rigidez entre os tipos de dormentes altera o módulo de via e, conseqüentemente, a distribuição de suporte de carga. Essa condição compromete a geometria da via e, quando associada ao aumento da velocidade, intensifica a instabilidade dinâmica dos vagões, elevando o risco de descarrilamento.

A análise foi corroborada pelos registros da equipe de manutenção, que identificaram defeitos e confirmaram a influência negativa da combinação de dormentes de concreto e madeira. Apesar disso, o trecho não apresenta risco operacional imediato, em função das restrições de velocidade aplicadas para adequação aos parâmetros de geometria acima dos limites de segurança da classe de via.



O segmento estudado possui projeto de renovação programado, com aplicação uniforme de dormentes de concreto monobloco. Até que essa condição seja implementada, recomenda-se a correção geométrica por meio do preenchimento dos gaps sob os dormentes, medida que contribui para elevar a rigidez da via e garantir maior segurança operacional.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos aos gestores da área de engenharia ferroviária da empresa VLI – Valor da Logística Integrada pelo apoio e incentivo à realização deste estudo, por disponibilizar ferramentas computacionais, como o software VAMPIRE, fundamentais para o desenvolvimento das análises e para a obtenção de resultados de elevada relevância técnica e científica.

6. REFERÊNCIAS

FRA, Federal Railroad Administration. ***Track and Rail and Infrastructure Integrity Compliance Manual***. U.S. Department of Transportation, Federal Register, Volume II, Chapter 2 Track Safety Standards, Washington, D.C., March 2, 2018.

KERR, Arnold D. ***The Determination of the Track Modulus K for the Standard Track Analysis***. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware. Newark. 2000.

KNOTHE, Klaus e STICHEL, Sebastian. ***Rail Vehicle Dynamics***. Springer. Berlim. 2003. DOI 10.1007/978-3-319-45376-7.

LIMA, Arthur de Oliveira; DERSCH, Marcus S.; LEE Jaeik e EDWARDS, J. Riley. ***Track Modulus Assessment of Engineered Interspersed Concrete Sleepers in Ballasted Track***. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2020.

MAROTTA, Raphael Damasceno e VALENTE, Lucas de Castro. ***Space Curve***. Juiz de Fora. 2012.

MAROTTA, Raphael Damasceno e VALENTE, Lucas de Castro. ***Harmonic Vehicle/Track Interaction: Using Simulation Tools to Increase Train Speeds and Safety Assurance***. Seminário Wheel Rail Interaction (WRI) - Heavy Haul, 2016. Chicago. 2016.

STEFFLER, Fábio. ***Via permanente aplicada: guia teórico e prático***. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2013. ISBN 978-85-216-2191-1.



DYNAMIC MULTIBODY ANALYSIS ON TRACK WITH CONCRETE AND WOODEN SLEEPERS

ABSTRACT

This study investigates the dynamic interaction between railway vehicles and track in a section where concrete and wooden sleepers alternate. The motivation arises from geometric variations observed after localized replacements of bi-block concrete sleepers with wooden sleepers, which modify the vertical stiffness of the track and may influence vehicle stability. To examine these effects, a multibody simulation was performed using the VAMPIRE software, based on an HFE freight wagon modeled in maintenance-limit condition and track geometry measured by the EM80 inspection vehicle. The analysis incorporates the distinct stiffness characteristics of each sleeper type and their spatial distribution, enabling an assessment of how these structural discontinuities affect the vehicle-track dynamic response. The study focuses on identifying mechanisms that promote harmonic excitation, vehicle instability, and conditions potentially associated with wheel unloading, providing technical insight into operational risks and maintenance strategies. The findings contribute to understanding the relationship between track stiffness variation, geometric irregularities, and dynamic behavior, offering support for engineering decisions aimed at improving track stability and operational reliability.

Keywords: *Track dynamics; Track modulus; VAMPIRE; Timber sleeper; Concrete sleeper; Wheel unloading.*