

## ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO *HEAVY HAUL CORRUGATION* EM TRILHOS NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE VAGÕES FERROVIÁRIOS TIPO GÔNDOLA

Daniel R. Oliveira, [daniel.rodrigues@ifpa.edu.br](mailto:daniel.rodrigues@ifpa.edu.br)<sup>1</sup>  
Suelen M. Camargo, [suelen.camargo@ifpa.edu.br](mailto:suelen.camargo@ifpa.edu.br)<sup>1</sup>  
Everaldo A. Fernandes, [suelen.camargo@ifpa.edu.br](mailto:suelen.camargo@ifpa.edu.br)<sup>1</sup>  
Welliton P. da Silva, [welliton.silva@ifpa.edu.br](mailto:welliton.silva@ifpa.edu.br)<sup>1</sup>  
Max Suell Dutra, [max@mecanica.coppe.ufrj.br](mailto:max@mecanica.coppe.ufrj.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal do Pará – Campus Marabá Industrial, Folha 22, Quadra especial, Lote especial II – Nova Marabá - Marabá, CEP: 68.508-970

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Mecânica – COPPE, Av. Horácio Macedo, 2030 -101, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, CEP 21941-450.

**Resumo:** Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o comportamento dinâmico de vagões ferroviários tipo gôndola, amplamente utilizados no transporte de minério de ferro. O estudo visa avaliar a influência de irregularidades nos trilhos, decorrentes do contato com as rodas, sobre a dinâmica de um vagão. Para tanto, o vagão é modelado com o auxílio de um software de simulação de sistemas multicorpos. Os parâmetros que definem este modelo computacional são obtidos a partir de um típico vagão gôndola. A via permanente é caracterizada tanto pela sua macrogeometria e topografia, como pela presença de irregularidades do tipo ondulatórias. As irregularidades selecionadas são aquelas que melhor descrevem o efeito de corrugação nos trilhos, resultante do desgaste causado pelo contato roda-trilho. As simulações computacionais são realizadas com o vagão em condição de carregamento pleno e vazio. Através das simulações são feitas comparações do comportamento dinâmico do vagão frente à alteração das velocidades, cargas e condição de via com ou sem corrugações. Por fim, os resultados são discutidos tendo como enfoque a influência dos desgastes do tipo Heavy Haul Corrugation, representados pelas corrugações modeladas, sobre o comportamento dinâmico e forças geradas no contato roda-trilho.

**Palavras-chave:** Comportamento dinâmico, vagão gôndola, Sistemas multicorpos, Corrugação em trilhos, Contato roda-trilho.

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo Shabana et al (2008) o transporte ferroviário está entre um dos modos mais amplamente utilizados no mundo inteiro, tanto para o transporte de carga, quanto de passageiros. Segundo ANTF (2014), em relatório elaborado pela em 2014, a movimentação de cargas pelas ferrovias brasileiras cresceu significativamente. No período de 1997 a 2014 houve um crescimento no transporte de cargas em geral de 44,1% em seu volume. Em especial o transporte de minério de ferro e carvão mineral teve um crescimento de 96,1%.

De acordo com Viganico (2010) para se garantir a produtividade e a segurança nas operações e assim se obter lucros, as operadoras ferroviárias têm investido principalmente em material rodante e em segundo lugar em superestrutura. Entretanto, alguns fatores devem ser considerados para a obtenção de uma maior eficiência do transporte ferroviário e estes estão ligados às características do contato roda-trilho como: velocidade de operação, carga por eixo, segurança contra o descarrilamento e desgaste.

Semprebone (2005) afirma que o aumento da velocidade e das cargas altera a dinâmica do contato roda-trilho, e devido a isto, os defeitos têm aumentado muito nas últimas décadas, e os desgastes evoluíram rapidamente, e veio a se tornar preocupante para a engenharia ferroviária. Assim, com uma maior incidência de defeitos e com o rápido desgaste da via, aumentaram-se os cuidados com a manutenção requerida pelo sistema, pois o desgaste dos trilhos quando atinge determinado limite exige a substituição dos trilhos. Devido ao alto custo do material e da manutenção envolvidas, tem se buscado meios de minimizar estes problemas sem afetar o desenvolvimento do sistema. Consequentemente muitas pesquisas vêm sendo realizadas em diversos países com estes propósitos.

Segundo Xuesong et al (2005), a corrugação é um dos mais sérios problemas em engenharia ferroviária. Segundo ele a formação da corrugação em trilhos pode causar vibrações severas da estrutura dos trilhos e veículos, causar ruídos e redução da vida útil de peças estruturais. Segundo ele, as companhias de transporte ferroviário gastam muito dinheiro para a manutenção e substituição de trilhos com corrugação por ano.

O objetivo do presente trabalho é investigar e realizar um estudo direcionado para vagões ferroviários do tipo gôndola, que são um dos veículos ferroviários de carga mais utilizados no Brasil, sendo este estudo voltado para o comportamento dinâmico em situação específica de trilhos com corrugação do tipo *Heavy Haul Corrugation*. Sendo assim, são avaliados os deslocamentos dos corpos e forças de interação presentes.

## 2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

### 2.1. Modelamento do vagão

Para o modelamento geométrico do veículo ferroviário foi utilizado o software *Universal Mechanism*. O veículo é considerado como um sistema de corpos rígidos e flexíveis conectados através de juntas e elementos de força. O vagão consiste dos seguintes corpos: corpo do veículo, laterais dos truques, travessas centrais, pratos-pião, ampara-balanços, rodeiros e caixas de eixo. Na figura 1 é mostrado o modelo feito no software UM, onde pode ser visto o sistema de coordenadas base:

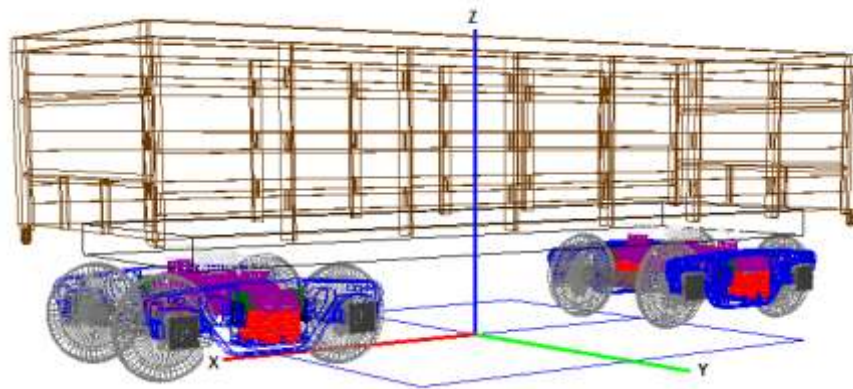


Figura 1. Desenho do vagão e o sistema de referência Base.

### 2.2. Modelamento da via permanente e Irregularidade nos trilhos

A via permanente foi modelada no software UM consistindo de uma via reta de comprimento 300 m possuindo as seguintes características:

- Bitola - 1600 mm (padrão bitola larga);
- Trilhos - UI 60 (padrão europeu).

A irregularidade dos trilhos que representa o desgaste do tipo *Heavy Haul Corrugation* foi modelada pela seguinte função senoidal como mostrado na Eq.1 como definido em Oliveira (2016):

$$Z = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (1)$$

Onde:

Z = Altura da irregularidade (mm);

A = Amplitude da corrugação (2 mm);

$\lambda$  = Comprimento de onda da corrugação (300 mm);

x = Posição longitudinal de determinado ponto do trilho (mm).

### Estudos de caso

Para o estudo do comportamento dinâmico do veículo ferroviário foram analisados os seguintes estudos de caso:

- Vagão vazio à velocidade de 30 m/s, percorrendo trilhos sem desgaste;
- Vagão vazio à velocidade de 30 m/s, percorrendo trilhos com corrugação;
- Vagão cheio à velocidade de 15 m/s, percorrendo trilhos sem desgaste;
- Vagão cheio à velocidade de 15 m/s, percorrendo trilhos com corrugação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações computacionais são mostrados a seguir. Nas figuras 2 e 3 são mostrados os deslocamentos angulares em z (*yaw*) da travessa central dianteira para as duas condições de vagão vazio a velocidade de 30 m/s e vagão cheio a velocidade de 15 m/s respectivamente:

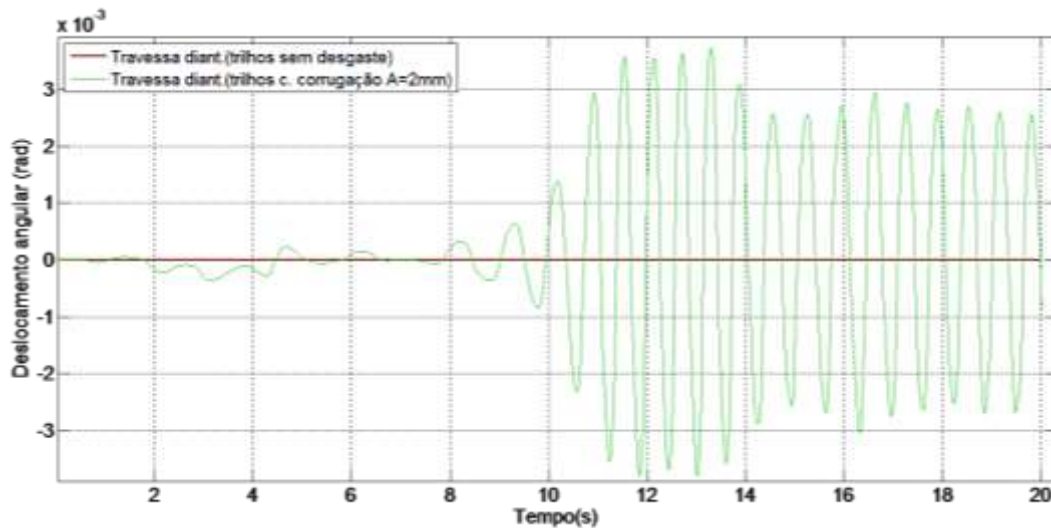


Figura 2. Deslocamento angular (*yaw*) da travessa dianteira do vagão vazio a velocidade de 30 m/s em trilhos sem desgaste e com corrugação de amplitude  $A = 2\text{mm}$ .

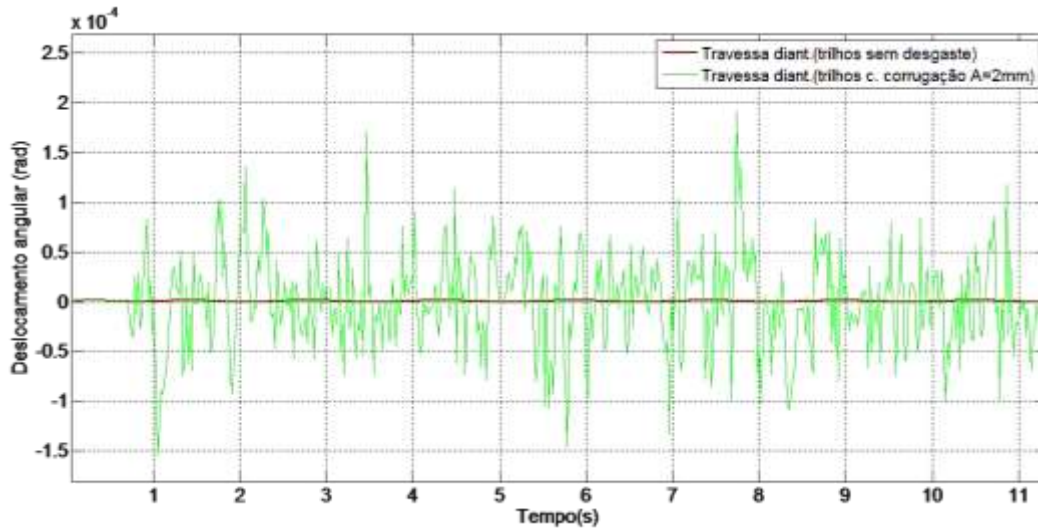


Figura 3. Deslocamento angular (*yaw*) da travessa dianteira do vagão cheio a velocidade de 15 m/s, e trilhos sem desgaste e com corrugação de amplitude  $A = 2\text{mm}$ .

O deslocamento angular da travessa representa o deslocamento angular (*yaw*) do truque, que pode identificar se há movimento de *hunting* do truque. Este acontece quando o truque perde a estabilidade e começa a sofrer oscilações laterais e angulares (*yaw*) que pode levar a um movimento crítico do veículo, que deve ser evitado. Na figura 2 se verifica, que para o vagão vazio, à velocidade de 30 m/s, a travessa dianteira praticamente não sofre deslocamentos angulares, e que as corrugações de 2 mm de amplitude geram oscilações angulares da travessa central, mais expressivas após 10s de simulação. Na figura 3, se verifica que quando o vagão se encontra cheio à velocidade de 15 m/s e com os trilhos não possuindo corrugações, a travessa não sofre deslocamentos. Já para o caso de trilhos com corrugação, se observa que a travessa sofre pequenos deslocamentos angulares da ordem de décimos de miliradianos.

Outro fator que foi avaliado foram as forças de *creepage*, que são as forças que são desenvolvidas no contato roda-trilho, que são desenvolvidas por causa da diferença nas razões de tensão dos dois corpos na região de contato. Nas figuras 4 e 5 são mostradas as forças de *creepage* lateral nas rodas do rodeiro 1 (rodeiro dianteiro do truque dianteiro) para as duas condições de vagão vazio a velocidade de 30 m/s e vagão cheio a velocidade de 15 m/s respectivamente:

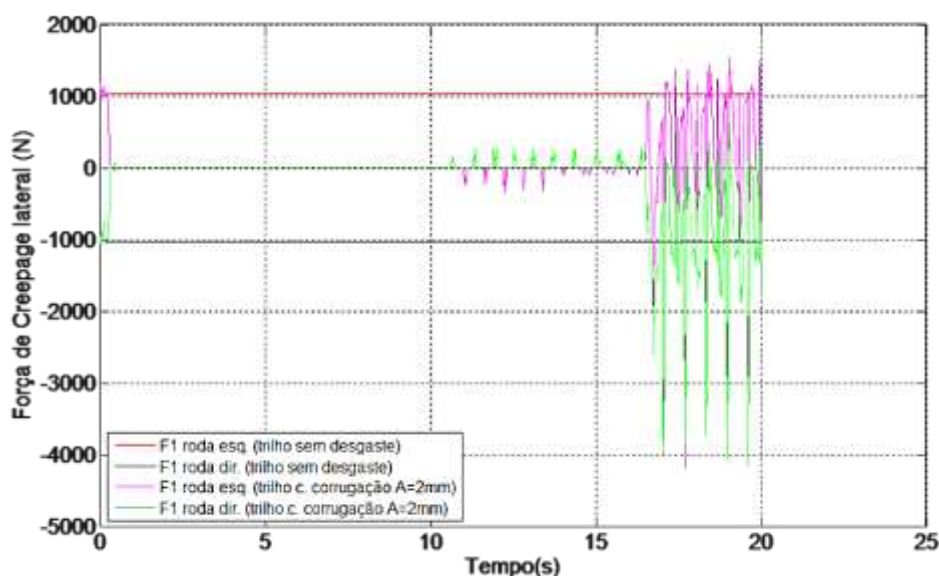


Figura 4. Forças de *creepage* laterais nas rodas do rodeiro 1 do vagão vazio a velocidade de 30 m/s e trilhos sem desgaste e com corrugação de amplitude de  $A=2\text{mm}$ .

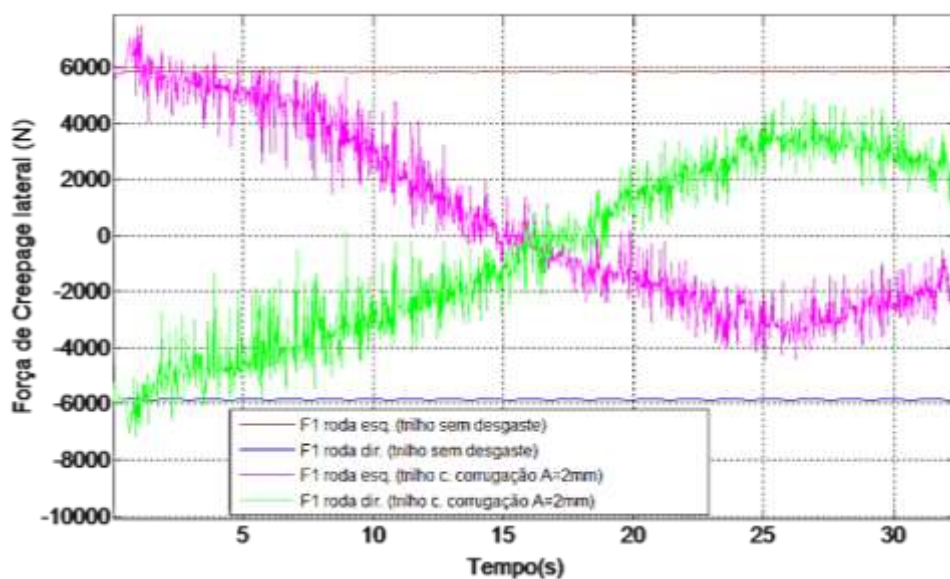


Figura 5. Forças de *creepage* laterais nas rodas do rodeiro 1 do vagão cheio a velocidade de 15 m/s e trilhos sem desgaste e com corrugação de amplitude  $A=2\text{mm}$ .

Na figura 4 se observa as forças de *creepage* nas rodas do rodeiro dianteiro do truque dianteiro. Quando o vagão está vazio e se move em trilhos sem desgaste, a força de *creepage* nas rodas esquerda e direita se mantém em 1000 N e -1000 N respectivamente, o que significa que as duas forças estão direcionadas para o centro da via. Para o caso do vagão transitando em trilhos corrugados, se verifica que nos 10 primeiros segundos de simulação não há presença de forças de *creepage*. As forças de *creep* surgem após os 10 s e ficam variando entre valores positivos e negativos, de -4000 N à aproximadamente 1500 N. Isto significa que as forças de *creepage* aumentam significativamente em valor, assim como de direção no contato roda-trilho.

Na figura 5, temos as forças de *creepage* para o caso de vagão cheio. Percebe-se que para o vagão que transita em trilhos sem desgaste, as forças de *creepage* na roda esquerda e direita são de 6000 N e -6000 N. Já para o caso do veículo transitando em vias corrugadas, se observa que as forças de *creepage* na roda esquerda oscilam e diminuem ao decorrer do tempo, até que voltem a crescer novamente, mas em sentido contrário (valores negativos). A roda direita apresenta o mesmo comportamento, porém em sentido inverso. Ambas as forças de *creepage* nas rodas esquerda e direita oscilam em frequências relativamente altas. Estas forças de contato podem gerar um maior desgaste das rodas e boletos dos trilhos, do que em condições normais de acordo com Oliveira (2016).

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que o defeito de *Heavy Haul Corrugation* em via reta afeta o comportamento dinâmico do vagão, de maneira sensível. O vagão sofre oscilações angulares dos truques (*yaw*) de amplitude muito pequenas, principalmente quando carregado, de maneira que as corrugações na amplitude estudada não levam a condições críticas como o fenômeno de *hunting*, que pode levar ao descarrilamento do trem.

A maior influência das irregularidades não está voltada, portanto ao comportamento dinâmico do veículo, mas sim às forças geradas no contato roda-trilho. As forças geradas se tornam oscilantes e em altas frequências, o que é observado para as forças tangenciais de *creepage*. Estas forças oscilantes de alta frequência podem implicar em fenômenos como fadiga de contato nas rodas e trilhos ou em outros componentes, fatos estes que devem ser estudados para comprovação.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Federal do Pará – Campus Marabá Industrial pelo apoio financeiro para a apresentação deste trabalho e a professora Suelen pela disponibilidade e boa vontade por representar o nosso Campus no evento.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Shabana, A.; Zaazaa, K.; Sugiyama, H. Railroad Vehicle Dynamics – A computational approach. crc press. 1<sup>ed</sup>. Boca Raton. 2008.
- ANTF. Relatório da Associação nacional dos transportes ferroviários. Associação Nacional de Transportes Ferroviários. Brasília. 2014.
- Viganico, C. E. H. Avaliação Dinâmica de Veículos Ferroviários através de um Sistema Multicorpos. Dissertação de M.Sc.. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. 2010.
- Semprebone, P. Desgastes em Trilhos Ferroviários – Um estudo Teórico. Dissertação de M.Sc.. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil. 2005.
- Xuesong, J.; Wang, K.; Wen, Z.; Zhang, W.. Effect of rail corrugation on vertical dynamics of railway vehicle coupled with a track. Acta Mech Sinica. n° 21. pp. 95-102. 2005.
- Oliveira, D. R. Dissertação de M.Sc.. Estudo sobre a influência de desgastes ondulatórios de trilhos no comportamento dinâmico de vagões ferroviários tipo gôndola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

#### 7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

### STUDY OF THE INFLUENCE OF HEAVY HAUL CORRUGATION ON RAILS AT THE DYNAMIC BEHAVIOR OF GONDOLA FREIGHT CAR

Daniel R. Oliveira, [daniel.rodrigues@ifpa.edu.br](mailto:daniel.rodrigues@ifpa.edu.br)<sup>1</sup>  
Suelen M. Camargo, [suelen.camargo@ifpa.edu.br](mailto:suelen.camargo@ifpa.edu.br)<sup>1</sup>  
Everaldo A. Fernandes, [suelen.camargo@ifpa.edu.br](mailto:suelen.camargo@ifpa.edu.br)<sup>1</sup>  
Welliton P. da Silva, [welliton.silva@ifpa.edu.br](mailto:welliton.silva@ifpa.edu.br)<sup>1</sup>  
Max Suell Dutra, [max@mecanica.coppe.ufrj.br](mailto:max@mecanica.coppe.ufrj.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Institute of Pará – Campus Marabá Industrial, Folha 22, Quadra especial, Lote especial II – Nova Marabá - Marabá, CEP: 68.508-970

<sup>2</sup>Federal University of Rio de Janeiro – Mechanical Engineering Department – COPPE, Av. Horácio Macedo, 2030 - 101, University City, Rio de Janeiro, CEP 21941-450.

**Abstract.** *In this paper is presented a study about the dynamic behavior of gondola freight car, widely used at iron ore transportation. The study aims evaluate the influence of rail irregularities, arising from contact with the wheels, about the wagon dynamic. Therefore, the wagon is modeled with the help of a simulation software of Multibody system. The parameters that define this computational model are obtained from a typical gondola wagon. The railroad is characterized both by its macrogeometry and topography, and by the presence of wave-like irregularities. The irregularities selected are those the best describe the effect of rail corrugations, resulting from wear caused by wheel-rail contact. The computational simulations are performed with the wagon in full and empty loading condition. Through the simulations, comparisons are realized of the dynamic behavior of the wagon with changes in speeds, loads and track condition, with or without corrugations. Finally, the results are discussed with a focus on the influence of wear of the type Heavy Haul Corrugation, represented by the corrugations modeled, on the dynamic behavior and forces generated in the wheel-rail contact.*

**Keywords:** *Dynamic behavior, Gondola wagon, Multibody systems, Corrugation on rails, wheel-rail contact.*