

# COMPARAÇÃO ENTRE MODELO DINÂMICO E QUASE-ESTÁTICO PARA ANÁLISE DE CONTATOS RODA-TRILHO

Thiago Leister Sá, Bacharel, USP, Brasil

Paola Gonzalez Ramos, Dra., UNICAMP, Brasil

Philippe Augusto de Paula Pacheco, MSc., IF Sudeste MG e UNICAMP, Brasil

Maria Clara Assunção Viana, Graduanda, UFES, Brasil

Guilherme Fabiano Mendonça dos Santos, Dr., UFES, Brasil

Auteliano Antunes dos Santos Júnior, Dr., UNICAMP, Brasil

Alfredo Gay Neto, Dr., USP, Brasil

## RESUMO

O estudo do contato entre a roda e o trilho de uma ferrovia é fundamental para o gerenciamento e otimização do desempenho de um sistema ferroviário. Uma variedade de forças atua simultaneamente em todas as direções da interface roda-trilho e a tensão gerada por essas forças depende da geometria da região de contato. Esse trabalho tem como objetivo comparar dois métodos de avaliação da interação roda-trilho: modelos quase-estáticos e simulações de dinâmica multicorpos. O primeiro é implementado no programa GIRAFFE e simula a interação de um único rodeiro com a via em uma abordagem quase-estática da dinâmica. O segundo avalia a dinâmica completa de um vagão ferroviário sobre um traçado de via utilizando o programa de simulação de dinâmica multicorpos SIMPACK®. A proposta de um modelo quase-estático visa a redução do tempo e do esforço computacional para aplicação em análises de *pummelling*, que utilizam milhares de casos de contato roda-trilho. Como resultado, o modelo quase-estático do GIRAFFE forneceu posição lateral do rodeiro, assim como pontos de contato, força normal, área de contato e pressão máxima, equivalentes às do modelo de dinâmica multicorpos do SIMPACK® para o trecho tangente em regime permanente. No entanto, para o trecho em curva as diferenças foram significativas. Assim, verificou-se a necessidade de inclusão das forças de *creep* lateral e, futuramente, da rigidez e vínculo fornecido pelo truque aos rodeiros nesta modelagem.

**Palavras-chave:** Contato roda-trilho; Mecânica do contato; Simulação multicorpos; Pummelling.

## 1 INTRODUÇÃO

A redução dos custos operacionais de uma ferrovia depende do gerenciamento e controle dos processos de desgaste e fadiga de rodas e trilhos, que estão intimamente ligados ao contato roda-trilho. De fato, rodas e trilhos estão entre as maiores despesas de uma ferrovia, junto com combustíveis. Na região de contato roda-trilho são determinadas as tensões normais e tangenciais do contato. Uma interface roda-trilho otimizada possibilita melhorar a qualidade do rolamento, reduzir os custos de manutenção e aumentar a segurança do transporte por meio da redução do desgaste nas rodas e trilhos, além de permitir a diminuição das forças correspondentes nos componentes da via e do veículo (EBERSÖHN et al., 2002).

O processo de otimização do contato roda-trilho não pode se limitar a cenários idealizados de um único par roda-trilho, pois justamente devido ao desgaste dos perfis, estes assumem diferentes formas ao longo de sua vida útil. Um projeto adequado de perfis de trilho e roda deve levar em conta toda a população de rodas e trilhos existentes nas composições e via respectivamente e, eventualmente, alternativas diversas. Buscando incorporar estas ideias no projeto de perfis, Magel e Kalousek (2002) introduzem o conceito de *pummelling*, que os autores definem como o processo de gerenciamento da posição, severidade e frequência dos contatos nas superfícies das rodas e trilhos para a redução dos incrementos de desgaste e fadiga. O objetivo é garantir uma distribuição de desgaste (perfil) que mantenha a geometria de contato otimizada. Este conceito propõe um desgaste mais uniforme da pista das rodas e redução na formação de perfis cavos, o que levaria à manutenção da estabilidade e do desempenho em curva. Já para o trilho, espera-se uma distribuição mais uniforme de desgaste e, principalmente, evitar a formação de trincas no boleto.

Sroba et al. (2006) aplicaram a análise de *pummelling* para avaliação de trilhos da *Canadian Pacific Railway* (CPR) que estavam sofrendo com um tipo de defeito por fadiga de contato de rolamento (em inglês, *rolling contact fatigue*, RCF), denominado *shelling*, com grande profundidade, que gerava fratura dos trilhos. Com base nos resultados obtidos os perfis de trilho foram otimizados, sendo bem-sucedido o controle do *shelling*.

No contexto de simulação e projeto de perfis de trilho o *pummelling* representa a análise de um trecho de via submetido ao trânsito de uma grande variedade de perfis de roda reais obtidos da medição das composições daquela operação ou cenário. Magel e Kalousek (2002) citam análises realizadas com 2000 perfis de roda para essa finalidade. O mesmo pode ser feito empregando um perfil de roda de interesse e que trafega por diferentes perfis de trilho ao longo da via. A vantagem deste tipo de análise com a consideração de uma gama de perfis medidos está em obter resultados mais realistas do desempenho de um perfil de trilho para uma dada operação, evitando perda de informação pelo uso de perfis médios ou de referência. A abordagem do *pummelling* é uma ferramenta eficaz para avaliar o desempenho da roda/trilho, porém é um processo computacionalmente caro (EBERSÖHN et al., 2002), pois necessita a execução de um grande volume de análises. Por isso, é importante o uso de modelos simplificados e confiáveis para representar a dinâmica do vagão.

Diferentemente das abordagens usuais que utilizam programas de simulação multicorpos para análise dinâmica transiente da interação completa entre vagão e via ferroviária, Higa, Kina e Gay Neto (2022) realizam simulações de relaxação dinâmica para obtenção da resposta quase-estática da interação de um único rodeiro com um trecho específico da via ferroviária, ou seja, utilizando uma simulação dinâmica simplificada

busca-se obter a posição de equilíbrio das forças estáticas e dinâmicas. Entende-se que deste modo a simulação quase-estática é capaz de representar a solução em regime permanente da simulação dinâmica.

O presente trabalho compara os resultados obtidos em simulações quase-estáticas adotando a metodologia proposta por Higa, Kina e Gay Neto (2022) com os resultados de simulações de dinâmica multicorpos de um vagão completo realizadas no programa SIMPACK.

## 2 DESENVOLVIMENTO

O modelo dinâmico desenvolvido no *software* multicorpos SIMPACK® e o detalhamento do modelo quase estático do *software* GIRAFFE são apresentados a seguir.

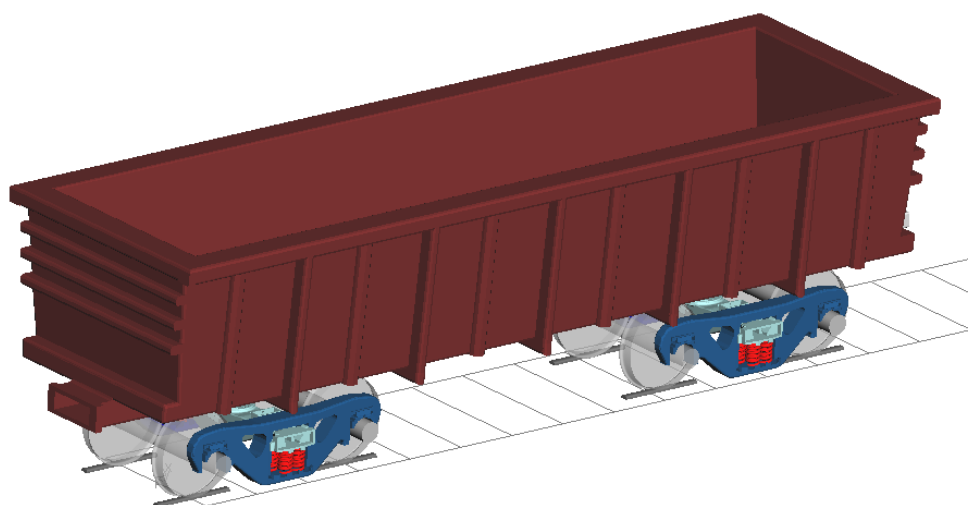
### 2.1 Modelo Dinâmico

A Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) conta com uma importante frota de vagões GDE – Ride Control. Um vagão deste tipo, completo, foi modelado no programa SIMPACK®.

Para o estabelecimento do contato roda-trilho utilizou-se o perfil de roda Design 2 e trilho TR68, com inclinação usual (1:40), que é o par usado pela EFVM. O trilho foi definido como elemento pertencente ao referencial inercial. O método FASTSIM (Teoria Simplificada de Kalker), padrão do SIMPACK®, foi o escolhido para os cálculos do contato roda-trilho.

O cenário simulado no SIMPACK® foi de uma via composta por: um trecho tangente de 150 m, uma espiral de transição de entrada e saída da curva, um trecho de curva para a esquerda de raio constante de 371,6 m e um trecho final tangente de 150 m; totalizando 619 m percorridos a uma velocidade constante de 52,2 km/h (14,5 m/s). A bitola da via é de 1000 mm e o trecho de curva conta com uma superelevação de 57,2 mm. A massa total do vagão carregado, truques e rodeiros é de 110000 kg.

A **Figura 1** mostra o modelo do vagão de bitola métrica modelado no programa SIMPACK®.



**Figura 1.** Modelo do Vagão GDE – Ride Control no SIMPACK®.

### 2.1.1 Distribuição de pressão no SIMPACK®

O SIMPACK® fornece a funcionalidade do *script*, uma interface com software externo e criação ou importação de funções para o SIMPACK® no Windows. É possível utilizar *scripts* para gerar e modificar modelos, executar simulações e pós-processar os resultados.

A comunicação entre os programas MATLAB® e SIMPACK® foi feita a partir de um script. Ao se executar o código no MATLAB® os perfis são exportados para o SIMPACK® e o script executa a simulação dinâmica. Ao finalizar, ele realiza o pré-tratamento dos dados e exporta os valores de volta para o MATLAB®. Feito isso, a distribuição da pressão no trilho é calculada considerando a Teoria de Contato de Hertz (JOHNSON, 1985). Essa distribuição de pressão assume a forma semi-elíptica, conforme a equação (1) na qual  $P_0$  é a pressão máxima de contato e  $b$  representa o semieixo da elipse de contato na direção transversal da via.

$$P(y) = P_0 \sqrt{1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (1)$$

Dessa forma, os dados retirados da simulação dinâmica são: pressão máxima de contato, semieixo da elipse e posição do contato no trilho.

Após inserir as informações necessárias e realizar a simulação, é necessário definir o local e a forma como serão colhidos os dados. Os resultados foram retirados do trecho em tangente em 100 m e na curva em 401 m. Essas posições foram escolhidas porque a resposta se encontra em regime estacionário para esses trechos.

## 2.2 Modelo Quase-estático do Rodeiro

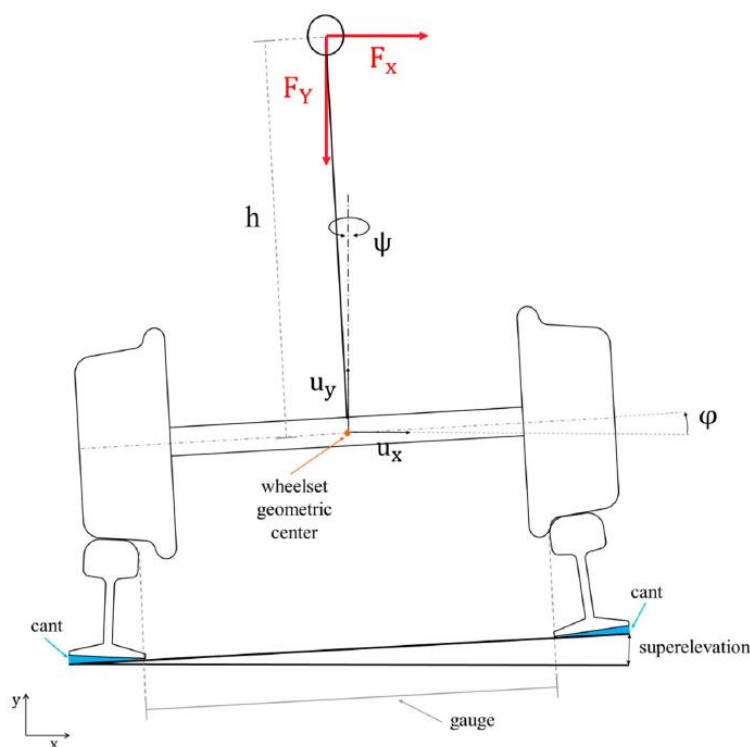
Na metodologia apresentada por Higa, Kina e Gay Neto (2022), em cada caso de simulação quase-estática do rodeiro são modelados: a via composta por dois perfis de trilho posicionados de acordo com bitola, *cant* e superelevação do cenário analisado; e um rodeiro rígido composto por dois perfis de rodas posicionados de acordo com a bitola de eixamento. Os trilhos são fixos enquanto o rodeiro está livre apenas para movimentação no plano transversal da via ( $u_x, u_y, \varphi$ ). Nesta simplificação o ângulo de ataque do rodeiro (ou *yaw*,  $\psi$ ) é sempre adotado como nulo (ver **Figura 2**).

Na metodologia quase-estática de simulação, o rodeiro parte de uma posição inicial arbitrária acima dos trilhos (sem contato) e, de forma gradativa, as forças gravitacionais e inerciais (força centrífuga em uma curva) referentes a um quarto do vagão são aplicadas no rodeiro em uma posição que representa a projeção do centro de gravidade do vagão no plano transversal da via adotado. Isso leva o rodeiro a entrar em contato com os trilhos até que encontre uma posição final de equilíbrio entre forças aplicadas e as forças normais de contato. Nesta metodologia as forças tangenciais de contato devido ao atrito de deslizamento ou rolamento não são consideradas. Para que o processo de relaxação dinâmica ocorra de forma suave e sem impactos que dificultariam a obtenção da resposta estável final, amortecedores fictícios são adotados entre o sistema global fixo da via e o centro do rodeiro.

Estas simulações são realizadas no programa GIRAFFE (*Generic Interface Readily Accessible for Finite Elements*), desenvolvido pelo Prof. Dr. Alfredo Gay Neto (2022) para análises estáticas e dinâmicas envolvendo elementos finitos, corpos rígidos e contatos. O programa GIRAFFE possibilita a solução de problemas de contato entre superfícies tridimensionais utilizando a abordagem *master-master* (GAY NETO; PIMENTA; WRIGGERS, 2016), na qual todos os possíveis pares de contato são

verificados a cada instante da simulação. Apesar de robusta e geral, esta estratégia pode levar a uma solução demorada do problema. Como a proposta da abordagem de *pummelling* é realizar a análise de um grande conjunto de casos, é importante a adoção de técnicas de simulação ágeis. Para tanto, Higa, Kina e Gay Neto (2022) implementaram no programa a solução particular do caso bidimensional da técnica de contato *master-master* entre curvas definidas por um conjunto de arcos. Isto possibilita a transformação do Problema Local de Contato (PLC, ou em inglês LCP) de solução numérica (iterativa) no caso tridimensional, para um problema de solução analítica no caso bidimensional. Mantendo a proposta da técnica *master-master*, todos os possíveis pares de contato são avaliados; para os pares em que se identifica uma penetração entre os arcos se aplica uma força proporcional e contrária à penetração e na direção de penetração normal dos arcos. A aplicação desta técnica tem a vantagem de fornecer naturalmente múltiplos pontos de contato simultâneos, o que é importante para o contato roda/trilho em situações de curva e/ou perfis muito desgastados.

Ao fim de cada simulação obtêm-se as posições dos contatos, descritas pelo índice do arco e posição angular em que se encontram, e as respectivas forças normais em cada contato. Utilizando a informação dos raios dos arcos em contato, força normal e propriedades mecânicas dos materiais em contato calcula-se a área de contato e pressão máxima de contato adotando a Teoria de Contato de Hertz.



**Figura 2.** Modelagem simplificada para interação roda/via. Fonte: (HIGA; KINA; GAY NETO, 2022)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi realizada a comparação entre os resultados do modelo de dinâmica multicorpos do SIMPACK® com os resultados dos modelos quase-estáticos do GIRAFFE seguindo a metodologia proposta por Higa, Kina e Gay Neto (2022) sem modificações. Nesta comparação foi verificado que a posição lateral do rodeiro no modelo do GIRAFFE não representava o comportamento observado no modelo do SIMPACK®.

Em seguida foram analisadas as forças normais e tangenciais nos contatos da simulação do SIMPACK® para identificação dos possíveis pontos de melhoria a serem incluídos no modelo do GIRAFFE.

Por fim, forças tangenciais obtidas no modelo do SIMPACK® foram adicionadas aos modelos do GIRAFFE e uma nova comparação dos resultados foi feita.

Cada uma destas etapas está descrita nas subseções a seguir.

### 3.1 Primeira Comparação

Para a primeira comparação com os resultados da simulação no SIMPACK® foram gerados dois modelos quase-estáticos no GIRAFFE, um para o trecho tangente e outro para o trecho em curva. Para o trecho tangente são modelados os dois perfis de trilho idênticos, posicionados seguindo a bitola da via e sem superelevação. Para esse, o rodeiro é modelado com os dois perfis de roda idênticos e é aplicada a força gravitacional referente a um quarto do veículo (269,7 kN). Para o trecho em curva, partindo do modelo anterior, é introduzida a superelevação da via por meio da rotação do conjunto de perfis de trilho que forma a via, e aplica-se, além da força gravitacional, uma força horizontal apontada para o lado direito (pois a curva é para a esquerda), que representa a força centrífuga da curva referente a um quarto do veículo, conforme a equação (2), na qual  $m$  é massa total do vagão,  $V$  é a velocidade de translação do vagão e  $R$  é o raio da curva.

$$F_{centr, \frac{1}{4}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{mV^2}{R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{110000 \cdot 14,5^2}{371,6} = 15,6 \text{ kN} \quad (2)$$

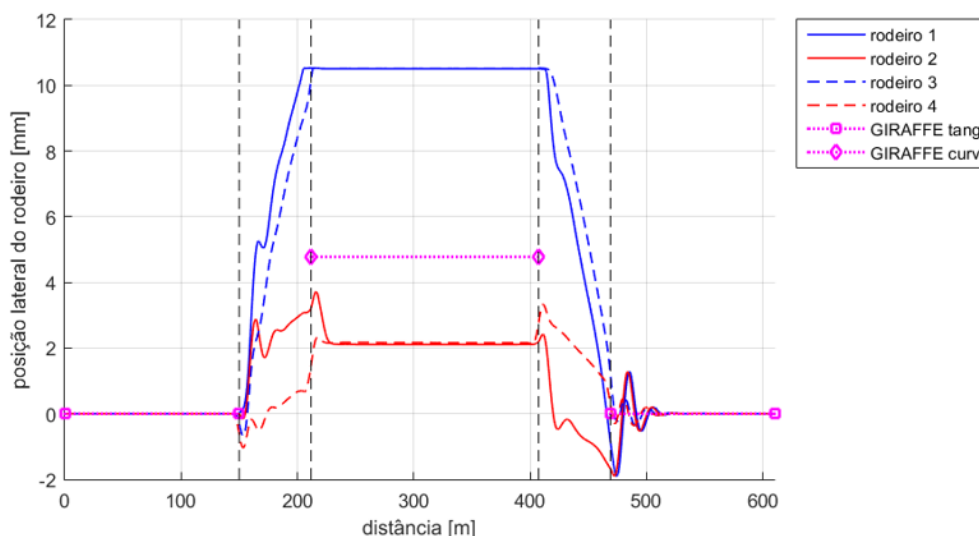
Os resultados da simulação no SIMPACK®, exportados para planilhas de dados, e os resultados das simulações no GIRAFFE, obtidos em arquivos de texto, foram então computados e analisados utilizando uma rotina no programa MATLAB®. Na **Figura 3** observa-se o gráfico da posição lateral de cada um dos quatro rodeiros do vagão ao longo do trajeto simulado no programa SIMPACK®, numerados de 1 a 4 a partir do rodeiro mais à frente do vagão (de ataque). As linhas verticais tracejadas servem de referência para delimitação dos diferentes trechos de via: tangente, transição, curva, transição e tangente, respectivamente. No mesmo gráfico é apresentado para comparação o resultado de posição lateral obtido em cada uma das simulações quase-estáticas realizadas no programa GIRAFFE para tangente e curva.

Os resultados do SIMPACK® mostram que todos os rodeiros percorrem o trecho tangente inicial sem deslocamento lateral, ou seja, centralizado a via, como esperado para um cenário de rodeiros e via simétricos, com todos os perfis de roda e trilhos iguais. No trecho de curva, observa-se que os rodeiros assumem posições bem distintas, com os rodeiros dianteiros dos dois truques (rodeiros 1 e 3) posicionados a 10,5 mm à direita do centro da via enquanto os rodeiros traseiros dos truques (rodeiros 2 e 4) ficam posicionados a 2,1 mm, à direita do centro da via. Esta posição é estabelecida após aproximadamente 20 m do início do trecho de curva com raio constante. No trecho tangente final, verifica-se a oscilação da posição lateral até 50 m após a saída do trecho de transição e, então, as posições dos rodeiros se estabelecem centralizadas na via, novamente como esperado.

Os resultados do SIMPACK® também mostram que existe, tanto para curva quanto para o trecho tangente pós curva, um regime permanente da posição lateral do rodeiro, ou seja, existe uma posição dinâmica estável do vagão. O gráfico também aponta que a posição lateral dos rodeiros dianteiros de cada truque (rodeiros 1 e 3) são praticamente idênticas, assim como para os rodeiros traseiros de cada truque (rodeiros 2 e 4). No entanto, são muito diferentes entre rodeiros dianteiros e traseiros do mesmo



truque. Isto possibilita admitir que o comportamento dinâmico de cada truque do vagão é o mesmo, mas que rodeiros dianteiros e traseiros devem ser avaliados de forma particular.

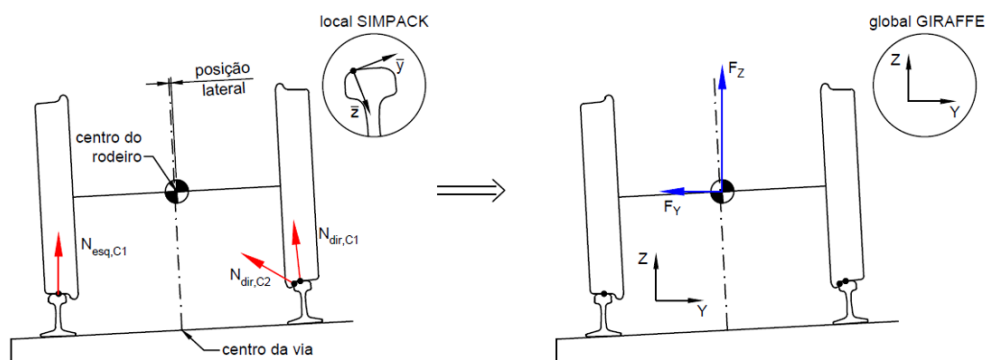


**Figura 3.** Gráfico da posição lateral dos rodeiros ao longo do trajeto simulado no programa SIMPACK e comparação com os modelos quase-estáticos do programa GIRAFFE.

O modelo quase-estático do GIRAFFE para o trecho tangente obtém a mesma posição centralizada do rodeiro na via observada na simulação do SIMPACK®. Já o modelo quase-estático do GIRAFFE para o trecho de curva resulta em uma posição 5,3 mm à direita do centro da via e que fica entre as posições dos rodeiros observadas na simulação do SIMPACK®. No entanto, estas posições estão longe de representar o comportamento de um dos rodeiros. Estas diferenças indicam que outras forças atuam nos rodeiros, ou que a distribuição das forças inerciais não ocorre de forma uniforme entre os rodeiros, como considerado. Isso os leva a se posicionar tão distantes entre si e da posição média obtida na simulação do GIRAFFE.

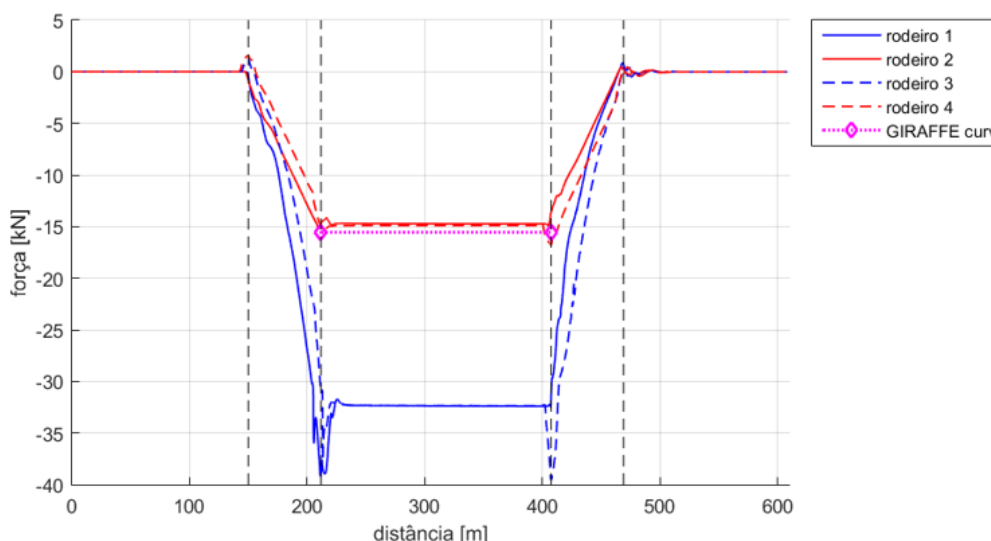
### 3.2 Investigação das Forças nos Contatos

Para melhor compreensão destes efeitos foram analisados os resultados da simulação do SIMPACK® para as forças normais e tangenciais nos contatos. As forças normais dos diferentes contatos de cada rodeiro foram combinadas em um par de forças resultantes, vertical e horizontal, no sistema global de coordenadas, para que pudessem ser comparadas com as forças aplicadas no modelo quase-estático do GIRAFFE, como mostra a **Figura 4**.



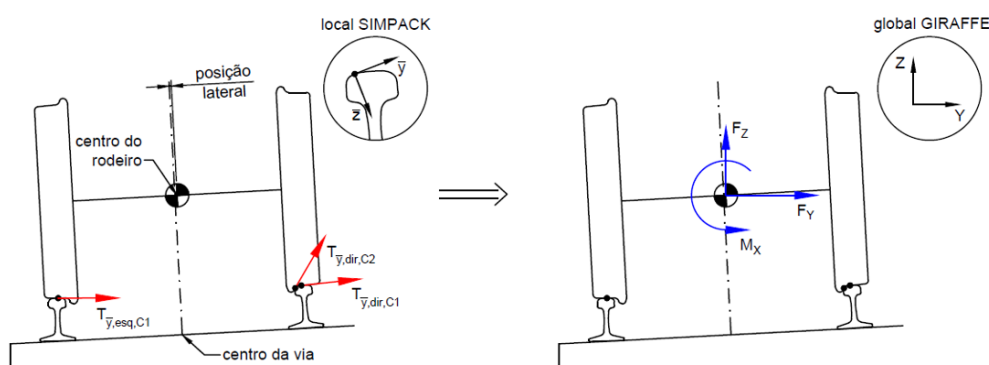
**Figura 4.** Transformação das forças normais de contato no sistema local para forças resultantes no sistema global de coordenadas.

A **Figura 5** apresenta o gráfico da componente horizontal desta força resultante das forças normais dos contatos de cada rodeiro ao longo do trajeto simulado no SIMPACK® comparado com o valor da força centrífuga aplicada no modelo quase-estático de curva do GIRAFFE. Verifica-se que a resultante para os rodeiros traseiros de cada truque (rodeiros 2 e 4) é aproximadamente 1 kN menor que a força centrífuga de referência e a resultante para os rodeiros dianteiros de cada truque (rodeiros 1 e 3) é 17 kN maior que a força centrífuga de referência. Logo, de fato, outras forças de mesma ordem de grandeza da força centrífuga atuam no rodeiro.



**Figura 5.** Gráfico da componente horizontal da força resultante das forças normais dos contatos de cada rodeiro.

Como a abordagem do modelo quase-estático do GIRAFFE é bidimensional, foram analisadas somente as forças de *creep* lateral do contato no plano transversal da via, pois atuam neste mesmo plano. Assim, como realizado para as forças normais do contato, as forças de *creep* lateral de cada contato do rodeiro foram somadas para obtenção de um par de forças e momento resultantes para o centro do rodeiro como mostra a **Figura 6**.

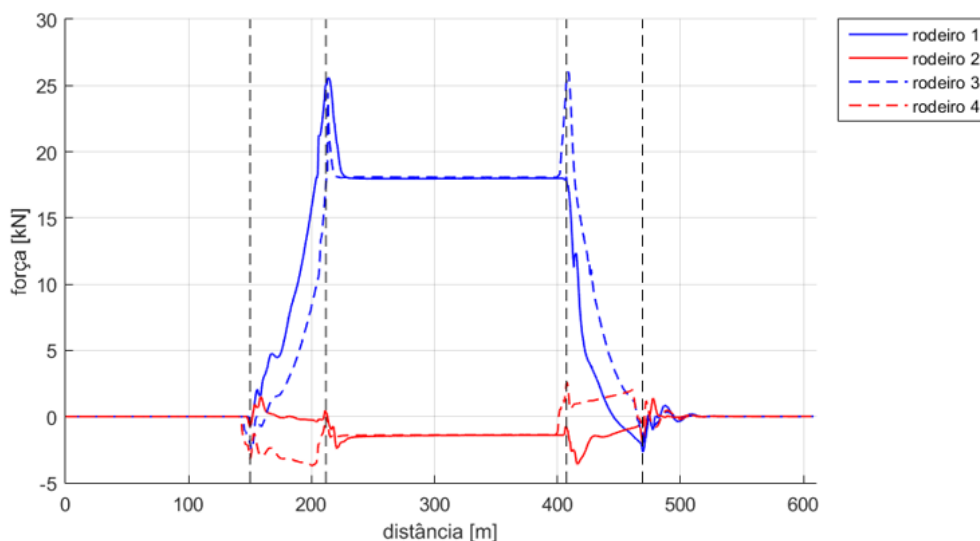


**Figura 6.** Transformação das forças de *creep* lateral dos contatos no rodeiro para um par de forças e momento resultantes no centro do rodeiro.

A **Figura 7** apresenta o gráfico apenas da componente horizontal desta força resultante para cada um dos rodeiros ao longo do trajeto simulado no SIMPACK®. Observa-se que no trecho de curva há, de fato, uma resultante de +18,0 kN nos rodeiros dianteiros de cada truque (rodeiros 1 e 3) e uma resultante de -1,4 kN para os rodeiros traseiros de cada truque (rodeiros 2 e 4). Estes valores estão bem próximos das diferenças



observadas no gráfico da **Figura 5**, ressaltadas anteriormente, indicando que as forças de *creep* lateral são a principal fonte das forças adicionais atuantes no rodeiro que se buscava.



**Figura 7.** Gráfico da componente horizontal da força resultante das forças de *creep* lateral dos contatos de cada rodeiro.

### 3.3 Segunda Comparação com Inclusão das Forças de Creep Lateral

Nesta segunda comparação, a componente horizontal, a componente vertical e o momento resultante das forças de *creep* lateral conforme **Figura 6**, obtidos na análise dos resultados do SIMPACK® no trecho de curva, foram introduzidos ao modelo quase-estático do GIRAFFE. Como já se constatou que rodeiros dianteiros e traseiros de cada truque têm comportamentos diferentes e resultantes diferentes, foram criados dois modelos quase-estáticos de curva no GIRAFFE, cada um representando um rodeiro diferente com suas respectivas forças aplicadas.

A **Figura 8** apresenta novamente o gráfico de posição lateral dos rodeiros ao longo do trajeto simulado no SIMPACK®, mas agora comparado com os dois novos modelos quase-estáticos de curva do GIRAFFE, sendo “curv1” o modelo com a inclusão da resultante das forças de *creep* lateral dos rodeiros dianteiros 1 e 3 do modelo do SIMPACK®, e “curv2” o modelo com a inclusão desta resultante para os rodeiros traseiros 2 e 4.

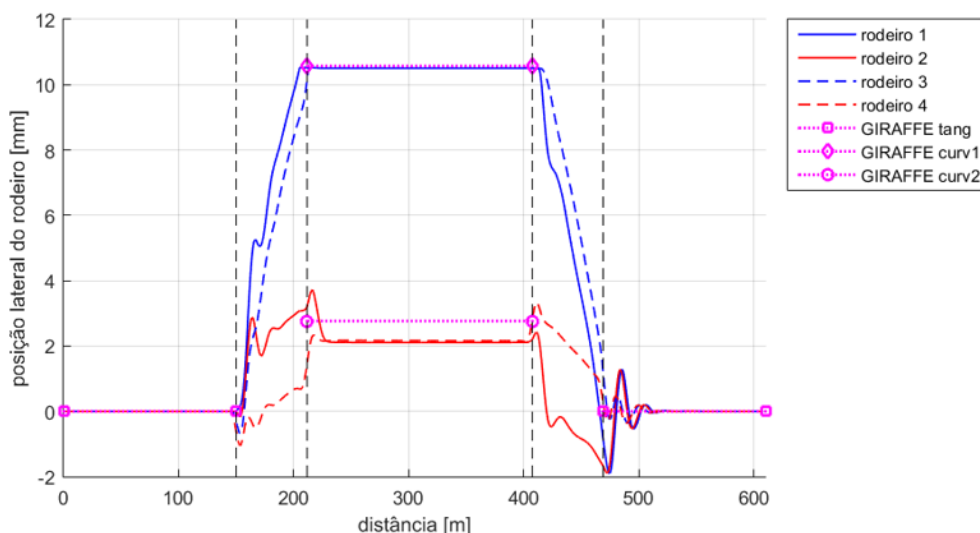
Observa-se que a inclusão destas resultantes possibilitou que os modelos quase-estáticos do GIRAFFE obtivessem posições laterais dos rodeiros mais próximas as da simulação do SIMPACK®. A posição lateral do rodeiro do modelo quase-estático “curv1” é a mesma dos rodeiros dianteiros 1 e 3 do modelo do SIMPACK®, já que nesta posição ocorre contato do flange da roda que limita o movimento lateral do rodeiro.

Já a posição lateral do rodeiro do modelo quase-estático “curv2” não é igual à dos rodeiros 2 e 4 do modelo do SIMPACK®, indicando novamente que outros fatores devam ser considerados em uma modelagem quase-estática de um rodeiro único. Acredita-se que estes fatores surgem do truque ferroviário, que gera um vínculo elástico entre as posições laterais dos rodeiros e possibilita que as forças de *creep* longitudinal tenham influência na posição lateral dos rodeiros.

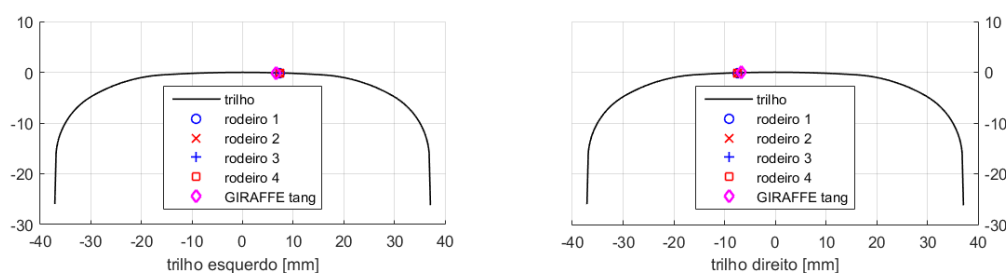
Após a comparação e validação das posições laterais dos rodeiros entre os resultados dos modelos, foram analisados os pontos de contato e suas respectivas forças normais, áreas de contato e pressões normais máximas obtidos no SIMPACK® e no GIRAFFE. Para o SIMPACK® estes valores são obtidos diretamente do programa,

enquanto para o GIRAFFE os pontos e forças normais de contato são obtidos diretamente e as áreas e pressões máximas de contato são calculadas considerando a Teoria de Hertz.

Para o trecho tangente observa-se na **Figura 9** que os pontos de contato nos trilhos direito e esquerdo são simétricos e quase coincidentes nos rodeiros simulados no SIMPACK® e no modelo quase-estático do GIRAFFE. A diferença lateral verificada é menor que 1 mm entre os pontos de contato dos modelos, valor baixo comparado com a largura da elipse de contato (13 mm). Na **Tabela 1** são comparados os resultados entre os modelos do SIMPACK® e do GIRAFFE para posição lateral do contato (referente a origem do perfil dos trilhos conforme a **Figura 9**), força normal de contato, área de contato e pressão máxima de contato.



**Figura 8.** Gráfico da posição lateral dos rodeiros ao longo do trajeto simulado no programa SIMPACK e comparação com os novos modelos quase-estáticos do programa GIRAFFE com inclusão das forças de creep lateral.



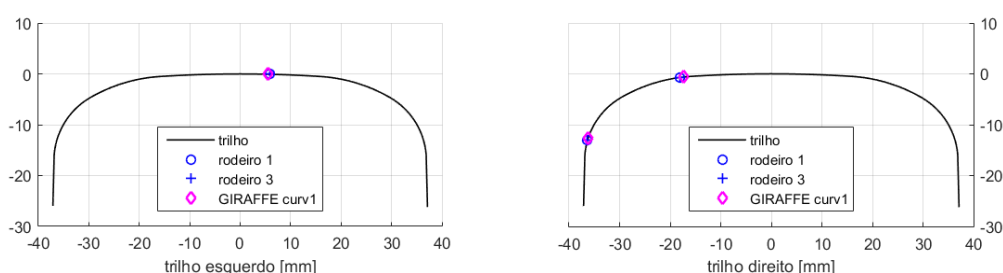
**Figura 9.** Pontos de contato nos trilhos obtidos nas simulações do SIMPACK e GIRAFFE para o trecho tangente.

**Tabela 1.** Comparação das propriedades do contato no trilho direito no trecho tangente entre SIMPACK® (rodeiro 1) e GIRAFFE.

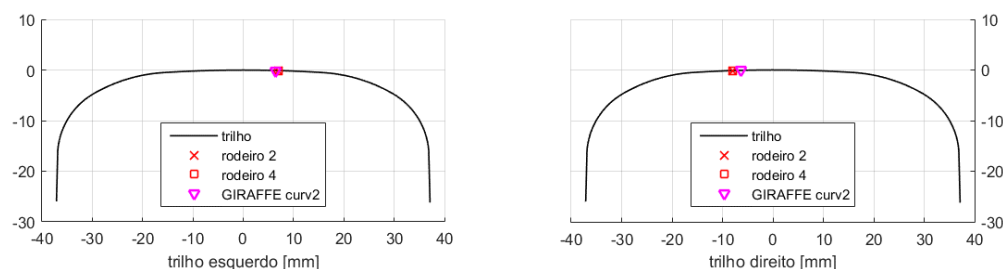
	SIMPACK	GIRAFFE	diferença	variação
posição lateral do contato [mm]	-7,4	-6,7	0,7	-9,5%
força normal [kN]	134,7	135,0	0,3	0,2%
área de contato [mm <sup>2</sup> ]	136,6	128,3	-8,3	-6,1%
pressão máxima [MPa]	1476,8	1578,5	101,7	6,9%

No cenário tangente o modelo quase-estático do GIRAFFE fornece resultados para o contato similares aos do modelo do SIMPACK®. Para uma mesma força normal de contato (apenas 0,2% de diferença) o modelo do SIMPACK® fornece uma área de contato maior e, conseqüentemente, uma pressão máxima de contato menor que o pós-processamento do modelo do GIRAFFE utilizando a Teoria de Hertz. Esta diferença deve estar associada ao fato de o SIMPACK® utilizar teorias semi-hertzianas para solução de contato que consideram a variação de curvatura dos perfis na zona de contato, enquanto no modelo do GIRAFFE os perfis são transformados em uma *spline* de arcos de curvatura constante que então é considerada na Teoria de Hertz.

Para o trecho em curva são comparados os pontos de contato entre os rodeiros dianteiros de cada truque (rodeiros 1 e 3) do modelo do SIMPACK com o modelo quase-estático “curv1” do GIRAFFE na **Figura 10**, e entre os rodeiros traseiros de cada truque (rodeiros 2 e 4) do SIMPACK® com o modelo quase-estático “curv2” do GIRAFFE na **Figura 11**.



**Figura 10.** Pontos de contato nos trilhos obtidos nas simulações do SIMPACK e GIRAFFE para o trecho em curva e rodeiros dianteiros.



**Figura 11.** Pontos de contato nos trilhos obtidos nas simulações do SIMPACK e GIRAFFE para o trecho em curva e rodeiros traseiros.

Durante a curva o modelo quase-estático do GIRAFFE, com a inclusão das forças de *creep*, fornece pontos de contato muito próximos aos obtidos na simulação do SIMPACK®. Para o rodeiro dianteiro verifica-se no trilho direito, trilho externo da curva ou trilho alto, a ocorrência de dois pontos de contato, um ponto mais ao topo do boleto (denominado de contato 1) e outro ponto abaixo do canto de bitola do trilho (contato 2). Observa-se que a posição lateral do rodeiro no modelo quase-estático “curv2” do GIRAFFE não coincidia com a dos rodeiros traseiros (rodeiros 2 e 4) do modelo do SIMPACK® (**Figura 8**). No entanto, verifica-se na **Figura 11** que os pontos de contato para o perfil de trilho se mantêm próximos para os diferentes modelos.

Na **Tabela 2** são apresentadas as propriedades do contato roda-trilho esquerdo (trilho externo da curva) do rodeiro 1 do modelo do SIMPACK® comparadas as do modelo “curv1” do GIRAFFE. O contato 1 indica o contato no topo do boleto do trilho e o contato 2 é o contato abaixo do canto de bitola do trilho. Para o contato 1 verifica-se 3,3% proximidade entre os modelos para ponto de contato e força normal; no entanto para

área de contato e pressão máxima a variação entre os modelos foi de 18,3% e 16,7%, respectivamente. Esta variação está relacionada com metodologia de obtenção e adoção das curvaturas para cálculo do contato, já que a posição deste contato se encontra próxima à mudança de arcos que ocorre no canto de bitola do perfil. No contato 2, os pontos de contato coincidem entre os modelos, mas as forças normais e, consequentemente, a área de contato e a pressão máxima têm grande diferença. Esta diferença é reflexo ainda da metodologia de modelagem dos rodeiros de forma independente no GIRAFFE, sem a consideração do truque atuando como uma vinculação entre os rodeiros.

**Tabela 2.** Comparação das propriedades do contato no trilho direito no trecho em curva entre SIMPACK (rodeiro 1) e GIRAFFE (“curv1”).

contato 1	SIMPACK	GIRAFFE	diferença	variação
posição lateral do contato [mm]	-18,1	-17,2	0,9	-5,0%
força normal [kN]	141,2	136,5	-4,7	-3,3%
área de contato [mm <sup>2</sup> ]	78,5	64,1	-14,4	-18,3%
pressão máxima [MPa]	2734,2	3191,6	457,4	16,7%
contato 2	SIMPACK	GIRAFFE	diferença	variação
posição lateral do contato [mm]	-36,3	-36,2	0,1	-0,3%
força normal [kN]	2,4	7,9	5,5	229,2%
área de contato [mm <sup>2</sup> ]	4,0	7,8	3,8	95,0%
pressão máxima [MPa]	760,6	1518,2	757,6	99,6%

Na **Tabela 3** são apresentadas as propriedades do contato roda-trilho direito (trilho interno da curva) do rodeiro 1 do modelo do SIMPACK® comparadas as do modelo “curv1” do GIRAFFE. Verifica-se neste contato boa aproximação entre os modelos para todas as propriedades.

**Tabela 3.** Comparação das propriedades do contato no trilho esquerdo no trecho em curva entre SIMPACK (rodeiro 1) e GIRAFFE (“curv1”).

	SIMPACK	GIRAFFE	diferença	variação
posição lateral do contato [mm]	5,9	5,5	-0,4	-6,8%
força normal [kN]	129,0	129,5	0,5	0,4%
área de contato [mm <sup>2</sup> ]	130,0	132,6	2,6	2,0%
pressão máxima [MPa]	1481,9	1465,7	-16,2	-1,1%

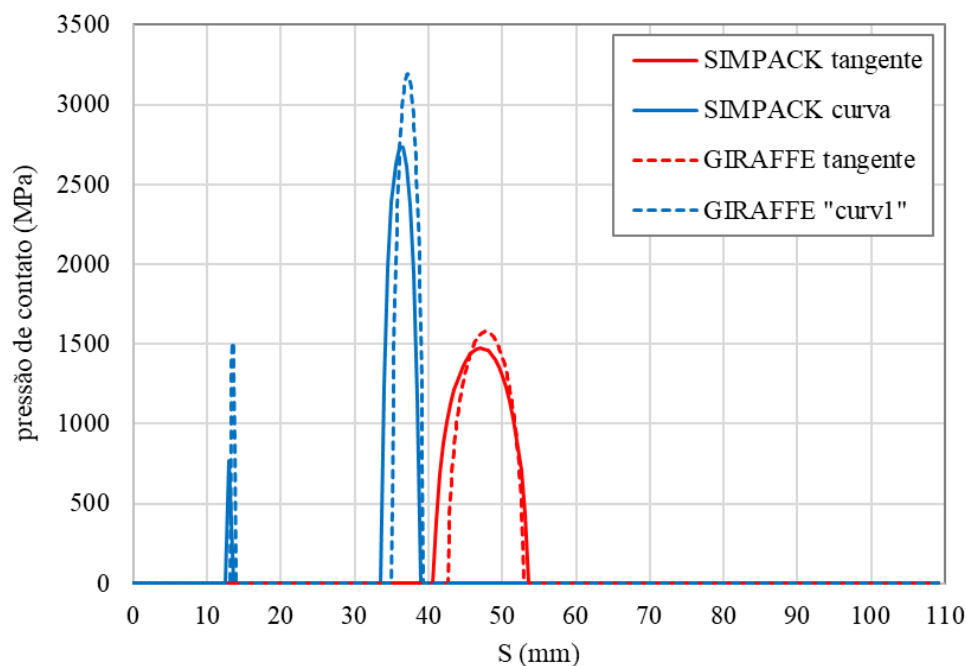
Como são pequenas as diferenças entre os pontos de contato no trilho esquerdo e direito para os rodeiros traseiros de cada truque (**Figura 11**), na **Tabela 4** são apresentadas apenas as propriedades do contato roda-trilho direito (trilho externo da curva) do rodeiro 2 do modelo do SIMPACK® comparadas as do modelo “curv2” do GIRAFFE. Como observado anteriormente (**Figura 8**) o modelo quase-estático do GIRAFFE não reproduziu a posição lateral do rodeiro obtida no SIMPACK®. Isto implicou em uma diferença na posição do ponto de contato entre os modelos maior do que nos demais casos avaliados, que levou também a maiores diferenças nas áreas de contato e pressão máxima. Este resultado também ressalta a necessidade de introdução do truque na modelagem dos rodeiros no GIRAFFE.

**Tabela 4.** Comparação das propriedades do contato no trilho direito no trecho em curva entre SIMPACK (rodeiro 2) e GIRAFFE (“curv2”).

	SIMPACK	GIRAFFE	diferença	variação
posição lateral do contato [mm]	-8,0	-6,3	1,7	-21,3%
força normal [kN]	135,5	137,4	1,9	1,4%
área de contato [mm <sup>2</sup> ]	141,2	129,8	-11,4	-8,1%
pressão máxima [MPa]	1447,6	1587,7	140,1	9,7%

A **Figura 12** mostra o resultado da distribuição da pressão no trilho para tangente e para curva, utilizando o SIMPACK® e o GIRAFFE, ao estilo do que foi apresentado por Higa, Kina e Gay Neto (2022). A coordenada S no eixo das abscissas descreve a posição ao longo do perfil do trilho com a origem na face de bitola do trilho. O centro do topo do boleto encontra-se na posição 54,5 mm. Analisando o resultado da tangente observa-se que a distribuição da pressão no SIMPACK® apresenta uma largura maior e um valor de pressão máxima menor, o que se deve ao fato de o SIMPACK® considerar a variação de curvatura dos perfis na zona de contato, enquanto no modelo do GIRAFFE considera uma *spline* de arcos de curvatura constante, como explicado anteriormente. Apesar disso, as diferenças observadas são pequenas, abaixo de 10%, sendo possível afirmar que o modelo quase-estático do GIRAFFE reproduziu bem os resultados de *pummelling* para a tangente.

Já na curva tem-se dois pontos de contato. No primeiro, ou seja, no topo do boleto tem-se um comportamento semelhante àquele encontrado na tangente, com uma aproximação adequada, tendo as diferenças encontradas os mesmos motivos elencados na tangente. No segundo, na lateral do boleto, os pontos de contato coincidem para os modelos, mas a área de contato e pressão máxima têm grande diferença entre os modelos. A diferença é reflexo da metodologia de modelagem dos rodeiros de forma independente no GIRAFFE.



**Figura 12.** Comparação da distribuição de pressão de contato no perfil do trilho nos cenários de tangente e curva entre os modelos do SIMPACK e do GIRAFFE.

## 4 CONCLUSÃO

No presente trabalho foram apresentados os resultados da comparação de dois métodos de avaliação da interação roda-trilho: modelos quase-estáticos e modelos de dinâmica multicorpos. O primeiro, implementado no programa GIRAFFE, simula a interação de um único rodeiro com a via em uma abordagem quase-estática da dinâmica. O segundo avaliou a dinâmica completa de um vagão ferroviário sobre um traçado de via utilizando o programa de simulação de dinâmica multicorpos SIMPACK®.

Com base nas análises e comparações apresentadas, conclui-se que o modelo quase-estático do GIRAFFE, na metodologia atual sem a inclusão de forças de *creep* dos contatos, fornece posição lateral do rodeiro, assim como pontos de contato, força normal, área de contato e pressão máxima, equivalentes as do modelo de dinâmica multicorpos do SIMPACK® em regime permanente para trecho tangente em que os perfis de trilho e roda são simétricos na via e rodeiro respectivamente.

Já para o trecho em curva, verificou-se a importância da inclusão das forças de *creep* lateral dos contatos para se obter nos modelos quase-estáticos posições laterais dos rodeiros próximas às observadas no modelo do SIMPACK®. Mesmo com esta inclusão permaneceram algumas diferenças entre os modelos quanto a posição lateral dos rodeiros traseiros e as forças normais nos contatos de flange dos rodeiros dianteiros.

Como continuidade deste trabalho sugere-se investigar a influência da rigidez e vínculo fornecido pelo truque aos rodeiros como parâmetro para redução das diferenças observadas no trecho de curva. Ainda devido a essas diferenças, sugere-se avaliar o impacto de vias ou rodeiros assimétricos nos resultados de trechos tangentes, já que nesses casos as forças de *creep* também podem ser significativas para o posicionamento do rodeiro.

## 5 AGRADECIMENTOS

O presente projeto agradece o apoio da Vale S.A. por meio das Cátedras Roda Trilho e Vagões, e do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) sob os processos 304321/2021-4 e 315304/2018-9.

## 6 REFERÊNCIAS

EBERSÖHN, W. et al. **Managing Wheel/Rail Performance on Amtrak's Northeast Corridor**. AREMA Annual Conferences. **Anais...** Washington: AREMA, 2002.

GAY NETO, A. **GIRAFFE Platform**, 2022. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/p/alfredo.gay/#giraffe-section>>. Acesso em: 28 fev. 2022

GAY NETO, A.; PIMENTA, P. M.; WRIGGERS, P. A master-surface to master-surface formulation for beam to beam contact. Part I: Frictionless interaction. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 303, p. 400–429, 1 maio 2016.

HIGA, D. N.; KINA, E. J.; GAY NETO, A. Wheelset-rail mechanical model for a steady-state dynamic condition and prediction of rolling contact fatigue locci. **Vehicle System Dynamics**, v. 60, n. 1, p. 281–308, 2022.

JOHNSON, K. L. **Contact Mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.



MAGEL, E.; KALOUSEK, J. The application of contact mechanics to rail profile design and rail grinding. **Wear**, v. 253, p. 308–316, 2002.

SROBA, P. et al. **The Evolution of Rail Grinding on Canadian Pacific Railway to Address Deep Seated Shells in 100% Effective Lubrication Territories**. World Conference on Railway Research. **Anais...**Montreal: 2006.

## COMPARISON BETWEEN DYNAMIC AND QUASI-STATIC MODEL TO EVALUATE WHEEL-RAIL CONTACTS

### ABSTRACT

The study of the contact between the railway wheel and rail is fundamental for managing and optimizing the performance of a railway system. A variety of forces act simultaneously in all directions at the wheel-rail interface, and the stress generated by these forces depends on the geometry of this contact region. This work aims to compare two methods for evaluating the wheel-rail interaction: quasi-static models and multibody dynamics simulations. The first is implemented in the GIRAFFE program and simulates the interaction of a single wheelset with the track adopting a quasi-static approach of its dynamics. The second evaluates the full dynamics of a railway wagon in a track route using the multibody dynamics software SIMPACK®. The goal of a quasi-static model is to reduce time and computational effort for its application in pummelling analysis for computing thousands of wheel-rail contact cases. As results, the GIRAFFE quasi-static model provided the lateral position of the wheelset, as well as contact points, normal force, contact area, and maximum pressure, equivalent to the SIMPACK® multibody dynamics model for the tangent section in steady-state. However, the differences were substantial for the curved section. Therefore, it was noticed the need to include the lateral creep forces, and in future work, the stiffness and constraints provided by the bogie on the wheelsets in this modeling.

**Keywords:** Wheel-rail contact; Contact mechanics; Multibody simulation; Pummelling.