



AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MODOS DE IRREGULARIDADE DE VIA NO PERFIL DE DESGASTE DE RODAS

Philippe Augusto de Paula Pacheco¹; Matheus Valente Lopes²; Guilherme Fabiano
Mendonça dos Santos³; Auteliano Antunes dos Santos²

¹Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais (IF Sudeste MG) – Brasil

²Laboratório Ferroviário (Lafer), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) – Brasil

³Laboratório de tribologia e dinâmica ferroviária (LabTDF), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – Brasil

RESUMO

O desgaste do perfil da roda é um fenômeno crítico na engenharia ferroviária, impactando diretamente a segurança, o conforto e os custos de manutenção. Este artigo apresenta uma análise sistemática e quantitativa da influência individual e combinada das quatro principais irregularidades geométricas da via – lateral (L), vertical (V), de superelevação (S) e de bitola (B) – na taxa e distribuição do desgaste de rodas. A metodologia baseia-se em simulações dinâmicas multicorpo (MBS) de um vagão de carga, utilizando uma via equivalente validada de um trecho de 505 km da Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) e irregularidades geradas via Espectros de Potência (PSD) da classe FRA 4. Um Projeto de Experimentos (DoE) fatorial completo 2⁴ foi empregado para isolar e quantificar os efeitos principais e as interações. Os resultados revelaram que a irregularidade lateral (L) é o fator dominante para o desgaste total e, especialmente, para a máxima penetração no friso, com efeito de $+7,86 \times 10^{-3}$ m. Já na pista, a irregularidade de superelevação (S) exerceu a maior influência ($+1,10 \times 10^{-3}$ m). A análise de interações identificou sinergias significativas, como L*S para a pista ($+2,12 \times 10^{-4}$ m) e L*B para o friso ($+5,63 \times 10^{-3}$ m). Entretanto, os efeitos principais superaram em magnitude os efeitos combinados. Observou-se ainda um comportamento de saturação não-linear: a adição da primeira irregularidade causou o maior impacto, com retornos decrescentes para as subseqüentes. Conclui-se que estratégias de manutenção e monitoramento devem priorizar o controle das irregularidades laterais e de superelevação, e que modelos preditivos simplificados, focados nessas componentes-chave, podem oferecer um equilíbrio eficaz entre acurácia e custo computacional.

Palavras-chave: Desgaste de rodas, Irregularidades da via, Simulação Multicorpo, Análise de Efeitos Principais, Interação veículo-via.

1. INTRODUÇÃO

A evolução do perfil da roda ao longo da operação ferroviária representa um dos principais mecanismos de degradação em veículos ferroviários, condicionando não apenas o comportamento dinâmico do material rodante, mas também a regularidade da via e os intervalos de manutenção corretiva. As rodas ferroviárias representam uma das principais fontes de custo operacional no ciclo de vida de um veículo ferroviário [1]. Portanto, o desenvolvimento de ferramentas capazes de prever, com acurácia e eficiência, a evolução desse desgaste é fundamental para otimizar perfis, planejar manutenções e investigar novas estratégias operacionais.

Nesse contexto, as simulações numéricas surgem como metodologia indispensável, permitindo estudar o problema complexo da interação veículo-via de maneira mais barata e rápida do que os testes em campo. Especificamente, as simulações dinâmicas multicorpos (MBS) estabeleceram-se como o padrão da indústria para capturar o comportamento realista do sistema veículo-via sob diversas condições operacionais [2]. Alternativas de menor custo computacional, como modelos quasi-estáticos, também estão sendo propostas para agilizar o processo de predição, ainda que com limitações conhecidas na representação de fenômenos dinâmicos [3,4].

Segundo Pacheco et al [5], a representação das irregularidades da via, principal fonte de excitação estocástica do sistema, são de extrema importância nas simulações, uma vez que contribuem para aumentar a representatividade da simulação. A inclusão dessas irregularidades nos modelos é essencial para obter distribuições de forças e desgaste mais realistas, pois inclui a distribuição dos pontos de contato ao longo do perfil da roda [6], o que acontece na prática. A metodologia mais consolidada para sua modelagem é a utilização de Espectros de Potência (PSD), que permitem a geração de perfis de irregularidades aleatórias e representativos da qualidade da via [7]. No entanto, esta representação realista implica um aumento significativo do custo computacional, tornando as simulações no domínio do tempo mais demoradas. Métodos combinados, como a integração de Amostragem Adaptativa (ASM) com funções harmônicas estocásticas (MSHF), têm sido explorados justamente para gerar amostras de alta representatividade estatística com menor número de simulações, melhorando a eficiência [8].

Para uma análise completa, as irregularidades são tipicamente categorizadas em quatro componentes geométricas independentes: Lateral, Vertical, de Bitola e de Superelevação (Rolagem) (**Figura 1**). Cada uma dessas componentes excita modos dinâmicos específicos do veículo (e.g., movimento de rolagem, arfagem, guinada), influenciando de forma distinta as condições de contato roda-trilho e, conseqüentemente, os mecanismos de desgaste [9,10].

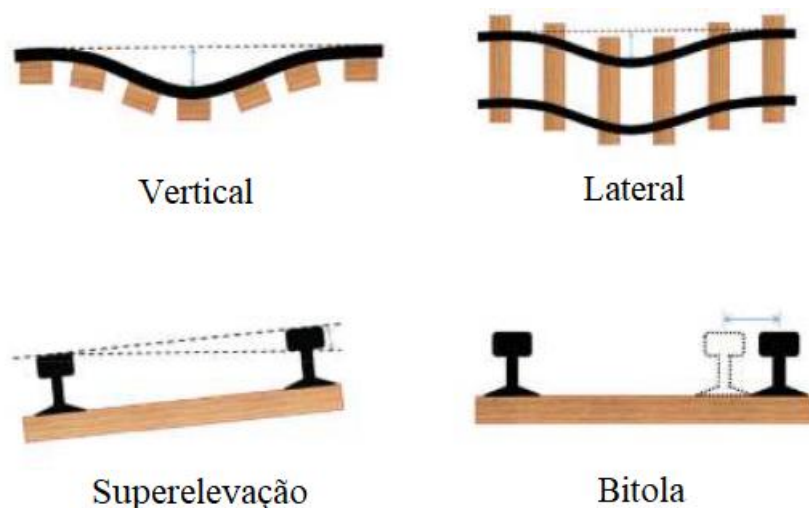


Figura 1. Tipos de irregularidades (Adaptado de [11]).

Embora a literatura seja consensual sobre a necessidade de incluir irregularidades nas simulações de desgaste, um problema de pesquisa relevante persiste: o efeito relativo e interativo de cada tipo de irregularidade no padrão e na taxa de desgaste das rodas permanece pouco explorado. A prática comum em muitos estudos é simular todas as



irregularidades simultaneamente. Contudo, trabalhos como o Apezetxea et al [4] sugerem que apenas a irregularidade de bitola seria suficiente para representar adequadamente o desgaste. Conclusões como esta, no entanto, carecem de uma análise sistemática e quantitativa que evidencie como se chegou a tal resultado. Essa lacuna deixa em aberto questões fundamentais, como a necessidade de identificar qual irregularidade isolada exerce o impacto mais severo, de verificar a existência de efeitos sinérgicos ou de cancelamento quando combinadas e de avaliar se uma simplificação do modelo que priorize uma ou duas componentes mantém a acurácia dos resultados.

Este artigo tem como objetivo principal sanar essa lacuna, investigando e quantificando a influência individual e combinada das irregularidades laterais, verticais, de bitola e de superelevação no desgaste do perfil de rodas ferroviárias. Para tal, é utilizado um modelo de simulação dinâmica multicorpos de um veículo ferroviário, no qual as irregularidades são inseridas de forma controlada e seletiva via PSD. Através de um conjunto planejado de simulações, busca-se:

- Isolar o efeito de cada componente de irregularidade na distribuição e magnitude do desgaste.
- Analisar os efeitos combinados de pares e de todas as irregularidades simultaneamente.
- Identificar qual componente é a mais influente e
- Avaliar o custo-benefício do emprego de modelos simplificados.
- Discutir as implicações dos resultados para o desenvolvimento de metodologias de predição de desgaste mais eficientes e direcionadas.

A estrutura deste artigo é a seguinte: a Seção 2 detalha a metodologia, incluindo o modelo multicorpos, a geração de irregularidades via PSD e o modelo de desgaste adotado. A Seção 3 apresenta e discute os resultados das simulações, comparando os cenários. Por fim, a Seção 4 resume as conclusões principais e sugere direções para trabalhos futuros.

2. DESENVOLVIMENTO

Este capítulo descreve a metodologia integralmente desenvolvida para analisar a influência das irregularidades geométricas da via no desgaste do perfil de rodas ferroviárias. A estrutura metodológica baseia-se em três pilares principais: (i) a modelagem multicorpos de um vagão de carga pesada (GDE - Ride Control), incluindo a representação detalhada dos elementos do truque de três peças, dos contatos roda-trilho e das suspensões primária e secundária; (ii) a definição do cenário operacional, compreendendo a modelagem de uma extensa linha ferroviária de bitola métrica por meio de uma via equivalente validada, que viabiliza as simulações dinâmicas computacionalmente; e (iii) a estratégia sistemática de investigação, que emprega um Projeto de Experimentos (DoE) fatorial completo para isolar e quantificar os efeitos individuais e combinados das irregularidades lateral, vertical, de superelevação e de bitola (Classe FRA 4) sobre o desgaste das rodas. A seguir, cada um desses componentes é apresentado em detalhe, estabelecendo as bases para a geração e análise dos resultados subsequentes.

2.1. Modelo dinâmico multicorpos

Para o presente trabalho, foi utilizado um vagão com truque de três peças com 27,5 toneladas por eixo, conhecido como GDE - Ride Control. O vagão foi modelado

empregando o programa multicorpos SIMPACK® (Figura 2). Este modelo foi validado e utilizado em trabalhos publicados anteriormente [12,3,13,14].

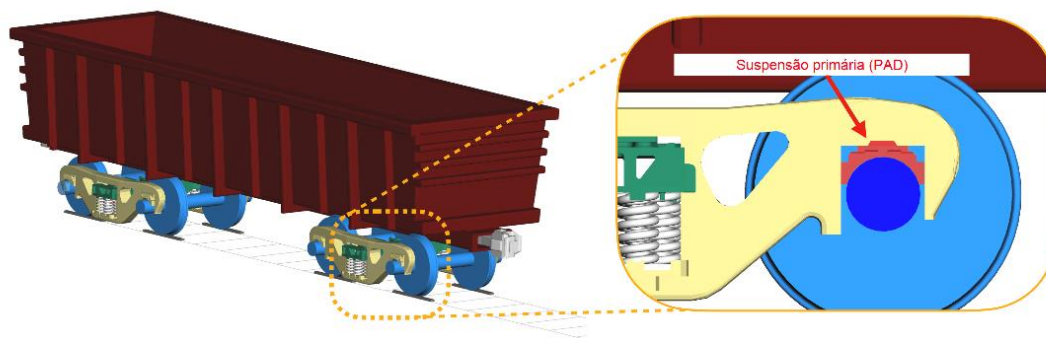


Figura 2. Modelo do vagão GDE-Ride Control modelado no SIMPACK® [15].

Os trilhos foram designados como componentes dentro do referencial inercial com inclinação (“cant”) de 1:40. Os perfis de trilho utilizados foram: CPF (ponto de contato no campo) para seções tangentes, CPC (ponto de contato no centro) para o trilho interno em curvas e High Rail para os trilhos externos (Figura 3). Para a interação dinâmica, adotou-se como referência o perfil de roda desenvolvido por Pacheco et al. [16]. Esse perfil, que tem como base o perfil padrão AAR-1B, foi otimizado numericamente para minimizar as taxas de desgaste, considerando especificamente os mesmos perfis de trilho aplicados no presente estudo.

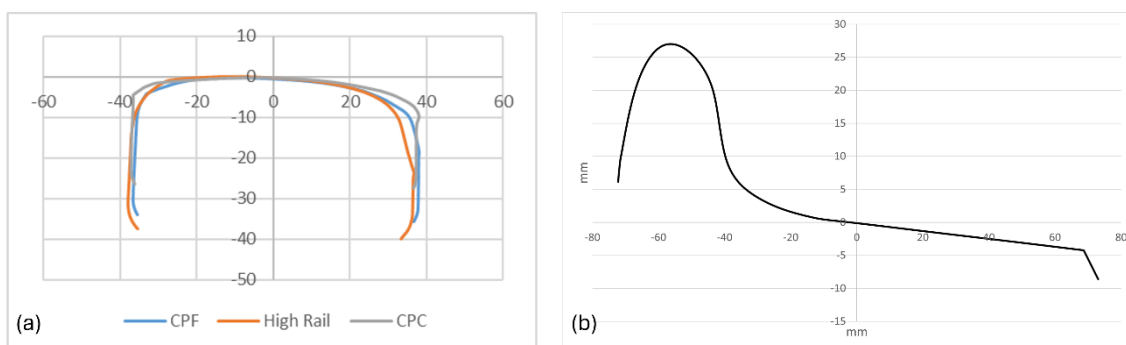


Figura 3. Perfis empregados no estudo: (a) perfis de trilho; (b) perfil de roda.

Para as forças de contato Roda-Trilho, R/T, foi utilizado o método “Discrete Elastic Contact” (DEC) [17] para garantir uma representação mais fiel o possível, ou seja, que considera o formato real da área de contato. Este é o método de contato semi-Hertziano fornecido pelo SIMPACK®. As forças normais e tangenciais são calculadas com base no formato real da área de contato. A forma de obter as forças tangenciais é semelhante ao FASTSIM. Este método, DEC, difere dos métodos convencionais porque todas as grandezas de entrada, como escorregamentos (“creepages”), velocidades de referência, pressões normais e curvaturas, são determinadas localmente dentro de uma única fatia discreta da área de contato [18] e o efeito de cada fatia é adicionado ao efeito total no contato.

Na suspensão primária, o rodeiro é acoplado ao pedestal da estrutura lateral por um adaptador de compósito PAD (Figura 2). No modelo multicorpos, este elemento foi representado como três pontos com elementos de conexão expressando rigidez e amortecimento vertical, lateral e longitudinal.

A suspensão secundária, conexão entre a travessa central e a lateral, foi modelada com uma mola tipo “bushing”, que contém os parâmetros de rigidez e amortecimento nas

direções X, Y, Z, além da rotação de guinada (“Yaw”), *rolagem* (“Roll”) e arfagem (“Pitch”). Além das molas, também fazem parte da suspensão secundária as cunhas. Nesse modelo, foi adotada uma modelagem específica para a cunha de contato constante, que é o elemento de intersecção entre a travessa central e a lateral. Para modelar o atrito seco entre as superfícies de contato da cunha foi utilizado também o método de elementos discretos de contato - DEC.

A Figura 4 mostra o modelo do truque Ride Control que foi modelado, de bitola métrica. A figura está dividida em quatro vistas do modelo. Na vista superior, estão alocados os elementos de força da suspensão primária e da secundária. Na frontal, estão os elementos de contato roda-trilho e a suspensão primária; já na lateral, são mostrados os elementos da cunha entre a travessa e a lateral, do mancal de rolamento e do contato R/T. Finalmente, na vista isométrica, é mostrado o truque completo.

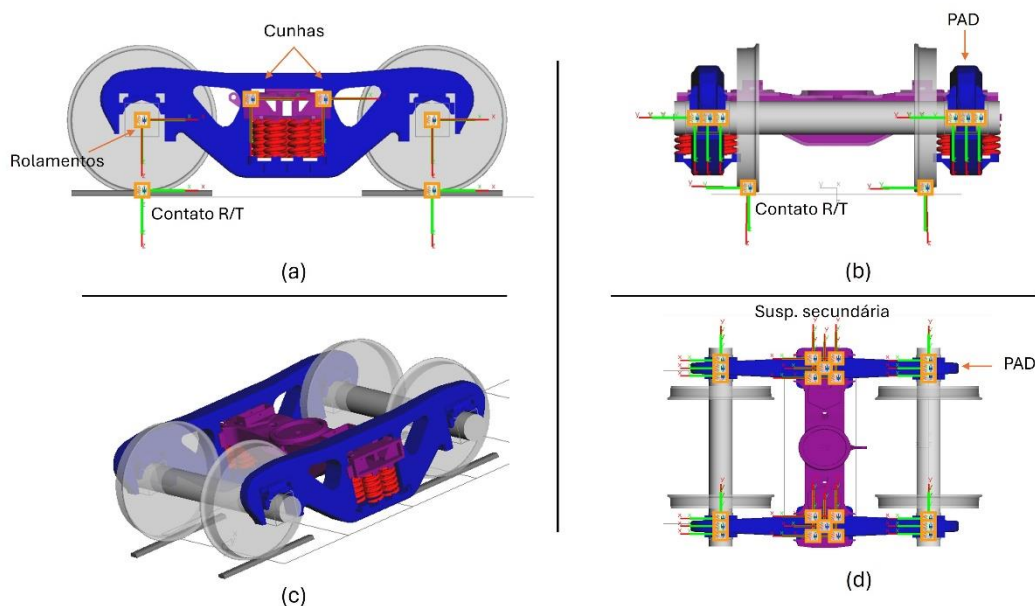


Figura 4. Modelo do Truque Ride Control, bitola métrica, feito no SIMPACK®, com os elementos de força das conexões: (a) vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista isométrica; (d) vista superior [15].

Concluído o modelo do truque, foi construído o modelo do vagão inteiro. Os pontos de conexão entre a caixa do vagão e os truques são no prato pião e no ampara balanço, cujas conexões são apresentadas na Figura 5. No prato pião, foram definidos quatro pontos de contato igualmente espaçados em 90°, com dois tipos de elementos cada, uma mola elástica (tipo “bushing”) com parâmetros de rigidez e amortecimento nas direções X, Y, Z, e de rotação para guinada, *rolagem* e arfagem, e um elemento de atrito seco. Para o ampara balanço, foi utilizado o mesmo tipo de mola, para a qual foi adotada uma função que descreve a rigidez nesse ponto, considerando uma folga de ativação, já que o tipo de ampara balanço modelado não é de contato constante.

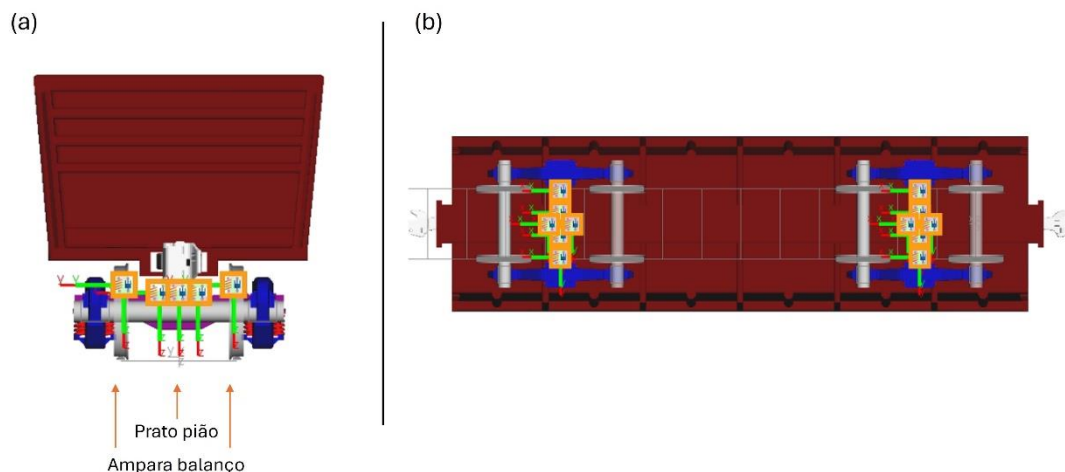


Figura 5. Modelo do Vagão GDE – Ride Control no SIMPACK® com os elementos de força das conexões. Vista frontal à esquerda e vista inferior à direita [15].

2.2. Design da via

Para este trabalho foi utilizado uma linha ferroviária brasileira de 505 km de extensão, utilizada para transporte de cargas pesadas (ver Figura 6). A linha possui bitola métrica e tráfego misto, incluindo trens de passageiros e de carga. O minério de ferro é o principal produto transportado nesta linha.

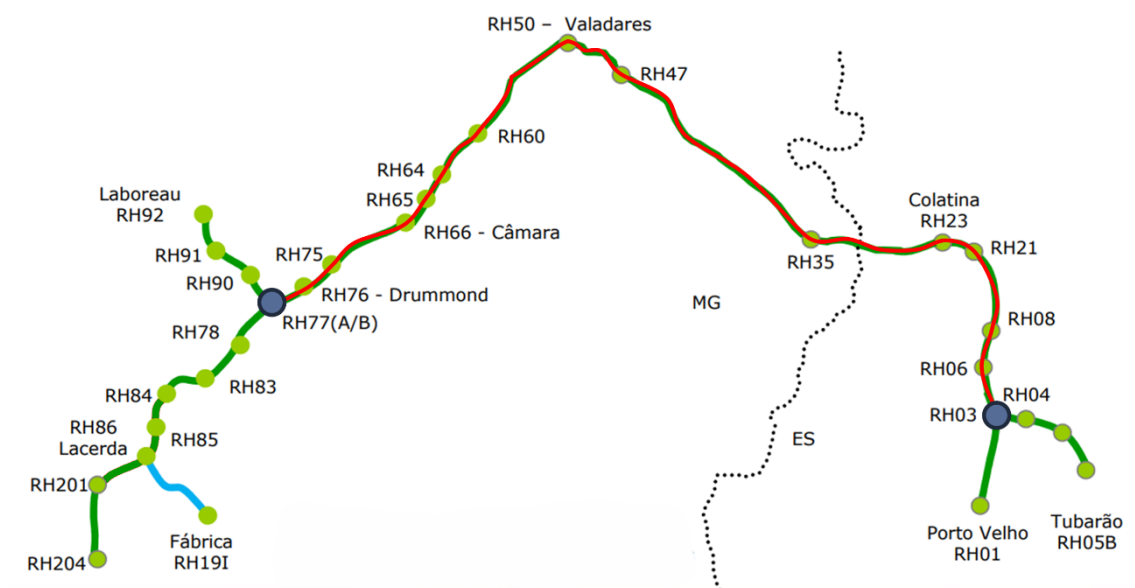


Figura 6. Mapa do trecho da ferrovia de carga em estudo destacado em vermelho.

Em função do elevado custo computacional inerente à simulação direta de um trecho ferroviário extenso e dotado de irregularidades geométricas, foi adotada a via equivalente desenvolvida para este mesmo segmento por Pacheco et al. [19]. Os autores validaram a precisão desse modelo equivalente, de 27 km, para análises de desgaste, reportando um erro quadrático médio (RMSE) de apenas 871 nm. Em termos de desgaste, os resultados demonstraram que os desvios na área desgastada são inferiores a 4,08%. Adicionalmente, os desvios na profundidade do desgaste na pista e no friso da roda são inferiores a 3,97% e 6,55%, respectivamente. Como principal vantagem prática, a simulação utilizando a via equivalente apresenta uma aceleração de processamento de até



17 vezes em relação ao modelo completo da pista, mantendo-se dentro dos parâmetros de precisão citados. A Figura 7 apresenta o layout da via equivalente.

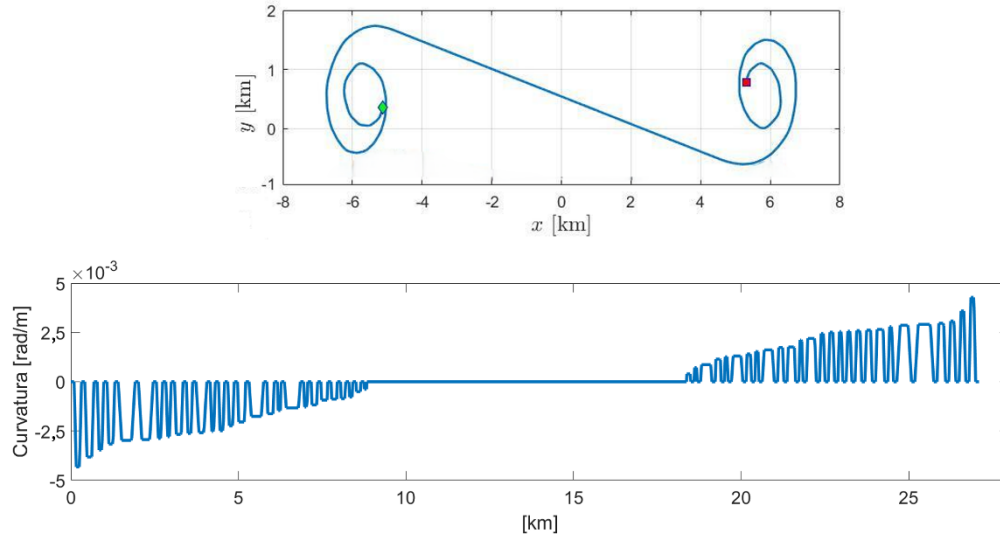


Figura 7. Traçado da via projetado (gráfico x-y) para a via equivalente (superior). Curvatura do traçado da via equivalente (inferior).

2.3. Irregularidades

As irregularidades foram incorporadas seguindo a normativa da *Federal Railroad Administration* (FRA). A norma define seis classes de irregularidades, sendo a Classe 1 utilizada para vias com menor qualidade e a Classe 6 para vias com maior qualidade. A ferrovia sob investigação neste trabalho é classificada como Classe 4 [16]. A função Densidade Espectral de Potência (PSD) para caracterizar excitações laterais, verticais e cruzadas (de bitola e superelevação) em trilhos é descrita pelas equações (1)-(3), respectivamente [7].

$$S_L(\Omega) = \frac{A_a \cdot \Omega_c^2}{\Omega^2 \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (1)$$

$$S_V(\Omega) = \frac{A_v \cdot \Omega_c^2}{\Omega^2 \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (2)$$

$$S_C(\Omega) = \frac{(A_a/b_i^2) \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_s^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (3)$$

onde Ω denota a frequência angular espacial; Ω_c , Ω_s denotam o número de onda crítico; A_a , A_v denotam os coeficientes de rugosidade; b_i denota a distância de referência entre os trilhos (bitola). Os coeficientes são definidos de acordo com o tipo de irregularidade e a qualidade das vias. Variam de 1 (pior) a 6 (melhor), conforme mostra a Tabela 1.



Tabela 1. Parâmetros da PSD para irregularidades FRA [7].

Classes	A_v [cm ² rad/m]	A_a [cm ² rad/m]	Ω_s^2 [rad/m]	Ω_c^2 [rad/m]
1	1,2107	3,3634	0,6046	0,8245
2	1,0181	1,2107	0,9308	0,8245
3	0,6816	0,4128	0,8520	0,8245
4	0,5376	0,3027	1,1312	0,8245
5	0,2095	0,0762	0,8209	0,8245
6	0,0339	0,0339	0,4380	0,8245

Em consonância com o objetivo deste trabalho, que propõe uma metodologia sistemática para investigar a correlação causal entre tipos específicos de irregularidades geométricas da via e o perfil do desgaste das rodas de veículos ferroviários, foram analisados quatro parâmetros independentes críticos: irregularidade lateral (L), vertical (V), de superelevação (S) e de bitola (B).

Cada parâmetro foi estudado em dois níveis, representados de forma codificada: presença da irregularidade FRA classe 4 (nível 1) e ausência da irregularidade (nível 0), constituindo uma configuração binária para isolamento de efeitos. Um Projeto de Experimentos (DoE) de tipo fatorial completo foi adotado para estruturar a investigação. Esta abordagem permite gerar todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores ($2^4 = 16$ combinações), possibilitando a avaliação não apenas do efeito principal de cada irregularidade, mas também de suas interações sobre a variável-resposta (desgaste da roda).

O objetivo do DoE aplicado é, portanto, combinar os parâmetros de entrada de maneira controlada para identificar e hierarquizar aqueles que exercem o impacto mais significativo na evolução do desgaste do perfil da roda. O conjunto completo de dados de simulação foi gerado com base nesta matriz experimental. Os valores codificados que definem os níveis de cada fator em todas as combinações ensaiadas estão detalhados na Tabela 2. Todas as simulações foram realizadas com velocidade constante igual a 60km/h.

Tabela 2. Níveis de fator codificados para DoE (0 = sem irregularidade; 1= com irregularidade).

Teste	L	V	S	B	Teste	L	V	S	B
1	0	0	0	0	9	0	1	1	0
2	1	0	0	0	10	0	1	0	1
3	0	1	0	0	11	0	0	1	1
4	0	0	1	0	12	1	1	1	0
5	0	0	0	1	13	1	1	0	1
6	1	1	0	0	14	1	0	1	1
7	1	0	1	0	15	0	1	1	1
8	1	0	0	1	16	1	1	1	1

O desgaste normal para cada posição transversal da roda foi calculado com base no modelo de Archard. Neste modelo, o volume de material removido (V) é uma função da força normal (N), da dureza do material mais mole (H), da distância de deslizamento (s) e de um coeficiente de desgaste adimensional (k), conforme a equação:

$$V = k \frac{N \cdot s}{H} \quad (4)$$



Neste trabalho, adotou-se o valor de 3.325 GPa. A Tabela 3 apresenta os valores do coeficiente k utilizados nas simulações.

Tabela 3. Valores de k para as regiões do mapa de desgaste.

Tipo de desgaste	Pressão de contato	Velocidade de escorregamento (m/s)	k
Moderado	$< 0,8H$	$< 0,2$	1×10^{-4}
Severo	$< 0,8H$	$0,2 < s < 0,7$	30×10^{-4}
Catastrófico	$> 0,8H$	$0,2 < s < 0,9$	300×10^{-4}
Moderado	$< 0,8H$	$> 0,7$	1×10^{-4}

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 8 apresenta os perfis de desgaste normal para as condições de teste 1 e 16, ou seja, sem irregularidade e com todos os tipos de irregularidades para FRA 4. Nota-se que a presença de irregularidades não apenas aumenta a magnitude do desgaste, mas também altera qualitativamente a distribuição do material removido ao longo do perfil transversal da roda.

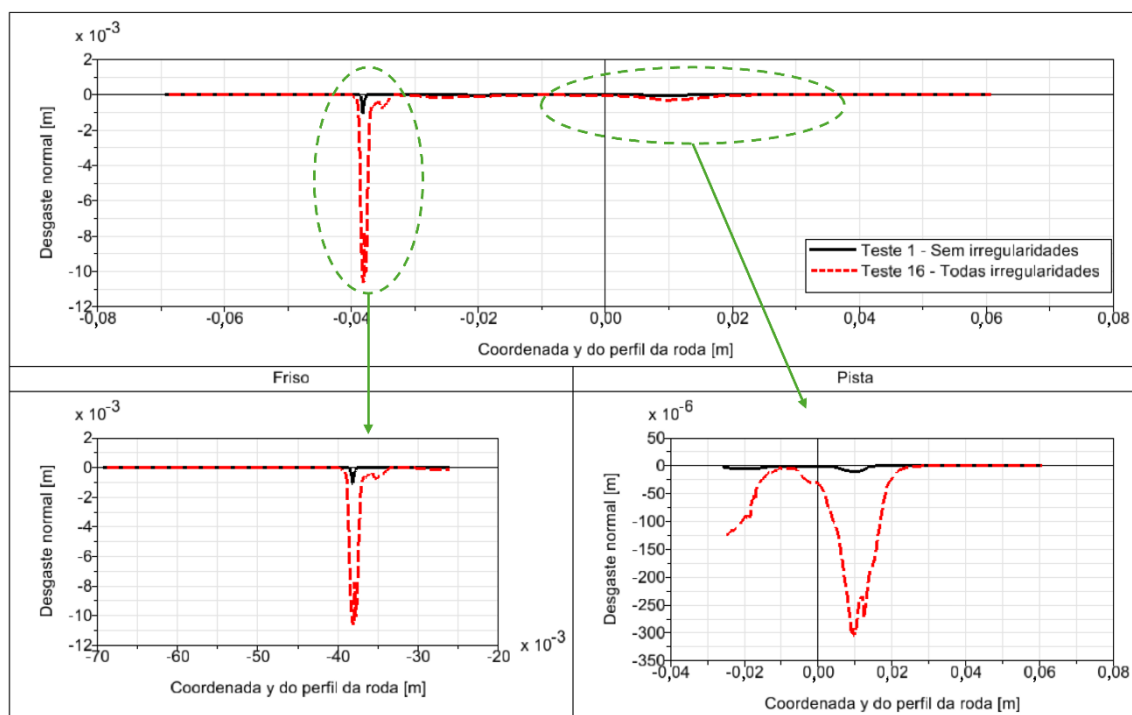


Figura 8. Desgaste normal da roda para as condições de teste 1 (sem irregularidades) e 16 (com todas as irregularidades). Na região inferior temos em destaque o desgaste no friso (à esquerda) e na pista (à direita).

As Figuras 9 a 11 apresentam os perfis de desgaste normal para as demais condições testadas. Observa-se que combinações específicas de irregularidades produzem padrões de desgaste atípicos, sugerindo fenômenos de interação não-lineares.

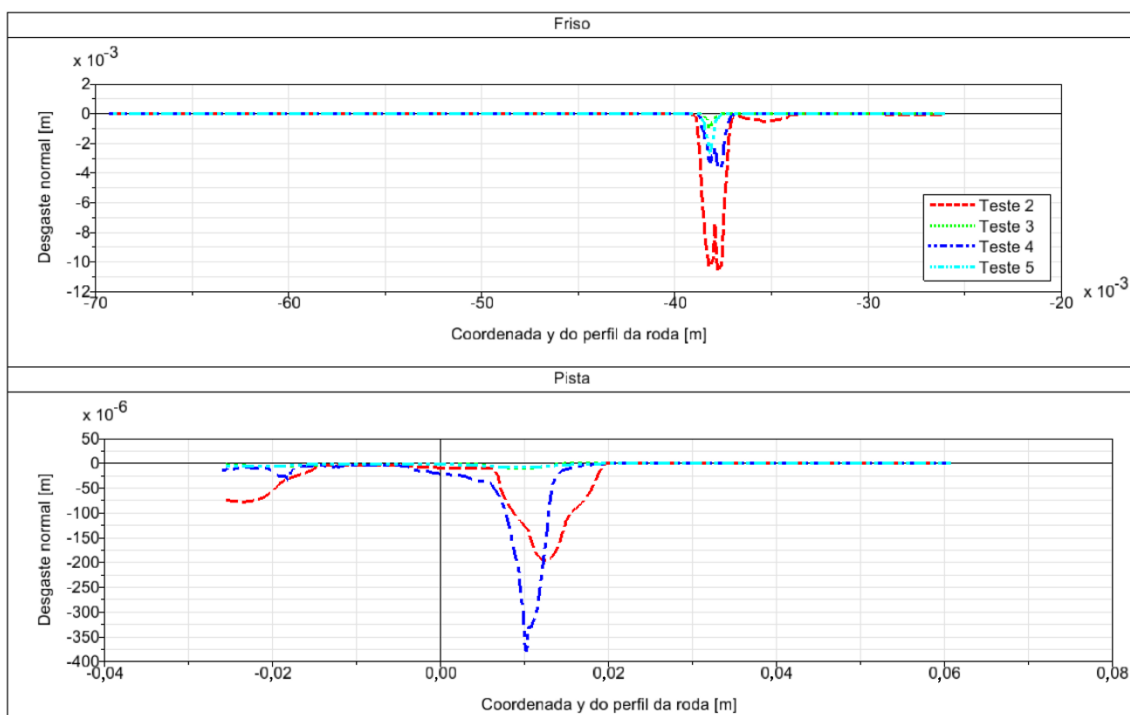


Figura 9. Desgaste normal da roda para as condições de teste 2 a 5 no friso e na pista.

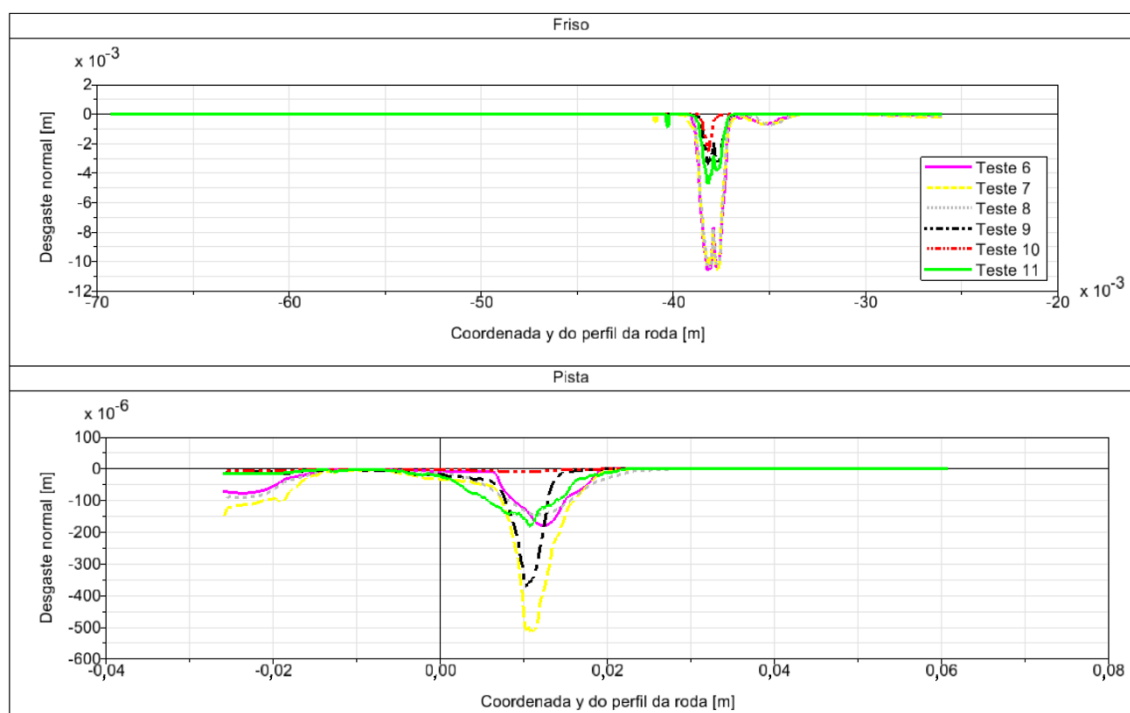


Figura 10. Desgaste normal da roda para as condições de teste 6 a 11 no friso e na pista.

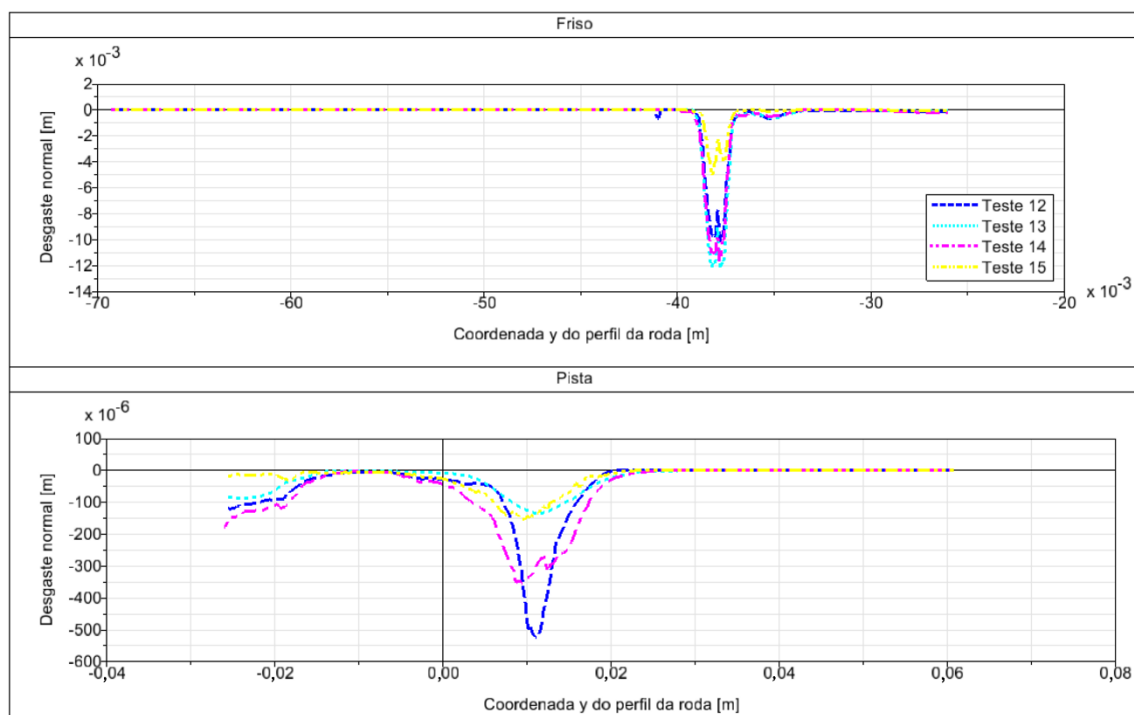


Figura 11. Desgaste normal da roda para as condições de teste 12 a 15 no friso e na pista.

A Tabela 4 apresenta os valores consolidados das métricas de desgaste calculadas para cada condição experimental. Os resultados demonstram que a área total desgastada variou de $5,26 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ (Teste 3) até $2,03 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ (Teste 14). Esta ampla variação confirma a sensibilidade do desgaste das rodas às irregularidades geométricas da via.

Tabela 4. Resultados consolidados das simulações.

Teste	Área Total [mm ²]	Área Pista [mm ²]	Área Friso [mm ²]	Máx Pista [μm]	Máx Friso [mm]
1	0,533	0,145	0,388	10,2	1,06
2	15,8	2,12	13,6	195	10,6
3	0,526	0,144	0,381	9,95	1,03
4	5,40	1,82	3,57	379	3,75
5	1,31	0,154	1,16	7,99	2,61
6	16,3	1,95	14,4	178	10,6
7	18,9	4,20	14,7	511	10,6
8	16,1	2,38	13,7	144	10,5
9	5,18	1,85	3,34	371	3,37
10	1,27	0,157	1,11	8,48	2,50
11	6,69	1,96	4,73	180	4,76
12	17,7	4,13	13,6	525	10,2
13	18,5	2,15	16,3	134	12,3
14	20,3	5,10	15,2	355	11,7
15	6,68	1,89	4,79	154	5,03
16	18,9	4,24	14,6	304	10,6

As distribuições espaciais do desgaste na pista e no friso (Figura 12) apresentaram comportamentos distintos. Enquanto, na condição basal, aproximadamente 27,25% do desgaste ocorre na pista, esta proporção varia significativamente com as irregularidades,



atingindo valores entre 18,44% e 22,45% nas diferentes condições. Este resultado indica que diferentes tipos de irregularidades afetam distintamente os mecanismos de desgaste nas duas regiões funcionais da roda.

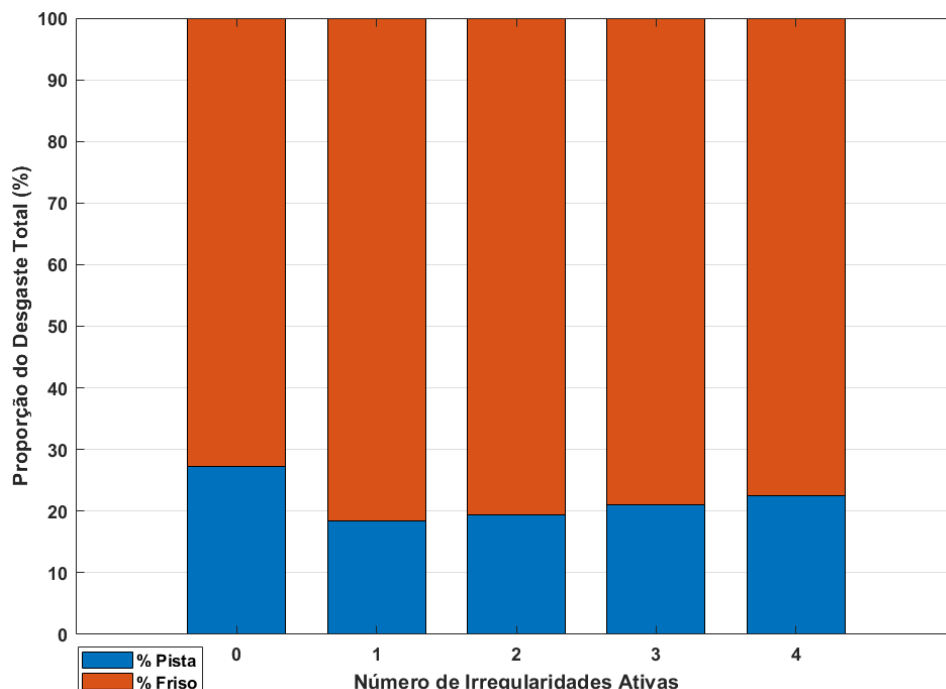


Figura 12. Distribuição do desgaste por região.

A partir de uma análise de regressão linear por mínimos quadrados ordinários (OLS) aplicada a um planejamento fatorial completo (2^4), foi possível quantificar a influência individual de cada tipo de irregularidade e de suas interações nos indicadores de desgaste. Dos quatro fatores investigados (L: irregularidade lateral, V: irregularidade vertical, S: irregularidade de superelevação, B: irregularidade de bitola), a irregularidade lateral (L) emergiu como o fator mais significativo, apresentando um efeito principal de $+14,35 \text{ mm}^2$ na área total de desgaste (Figura 13). Este comportamento pode ser atribuído à amplificação dos movimentos oscilatórios laterais do rodeiro, que induz incrementos significativos nos escorregamentos na interface roda-trilho, concomitantemente com a intensificação do contato no perfil do friso, resultando em acréscimos nas taxas de desgaste. A irregularidade de superelevação (S) demonstrou o segundo maior impacto ($+3,68 \text{ mm}^2$), seguida pela irregularidade de Bitola (B, $+1,16 \text{ mm}^2$). Curiosamente, a irregularidade vertical (V) apresentou efeito moderado ($8,08 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$), sugerindo que, em certas condições, pequenas variações verticais podem redistribuir as forças de contato de forma a reduzir localmente o desgaste, embora este efeito deva ser interpretado com cautela considerando as implicações de segurança operacional.

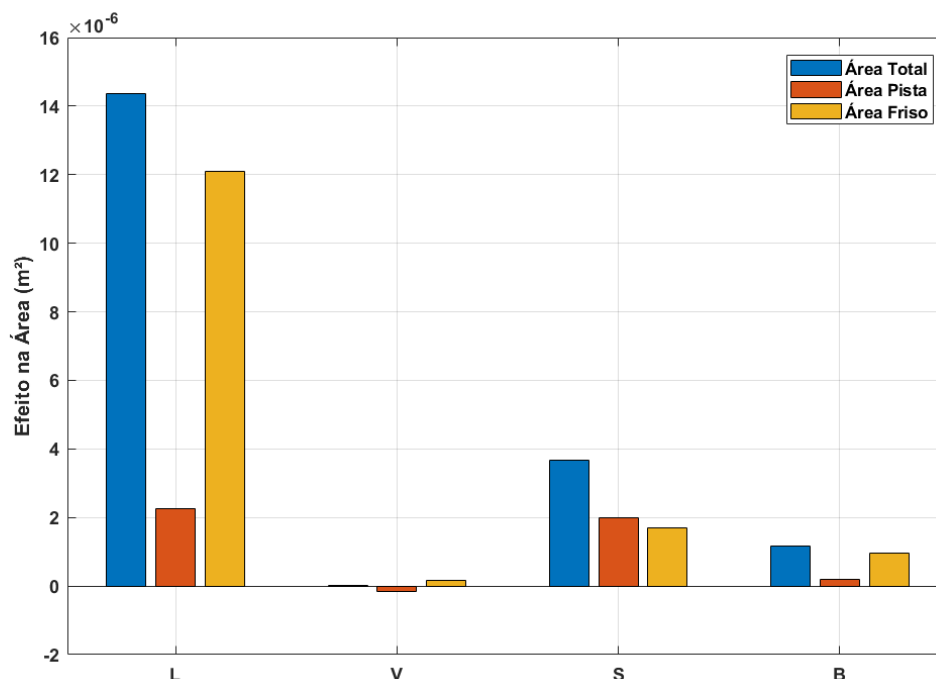


Figura 13. Efeitos Principais nas Áreas de Desgaste.

A Figura 14 apresenta os efeitos principais nos valores máximos de desgaste, discriminados por região (pista e friso). A irregularidade lateral (L) demonstra a maior influência sobre a profundidade de desgaste no friso, com efeito de +7,86 mm. Em contraste, a irregularidade de superelevação (S) exerce maior impacto na pista, com efeito de +1,10 mm. A irregularidade de bitola (B) apresenta efeito negativo na pista (-0,11 mm), sugerindo que determinadas configurações de desalinhamento de bitola podem mitigar a profundidade de desgaste nessa região. A irregularidade vertical (V) não apresentou efeitos estatisticamente significativos ($p > 0,05$) sobre a profundidade de desgaste em ambas as regiões.

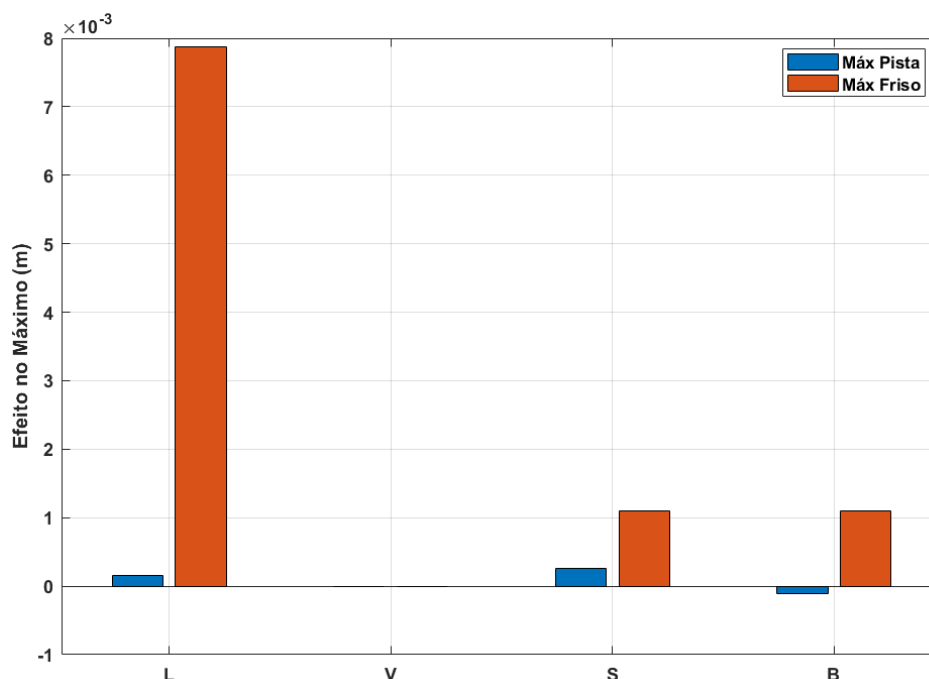


Figura 14. Efeitos Principais nos Máximos de Desgaste.

O aspecto mais relevante desta investigação reside na identificação e quantificação das interações entre diferentes irregularidades. Figura 15 e Figura 16 apresentam os 15 efeitos estimados (4 principais + 11 interações) ordenados por magnitude absoluta para pista e friso, respectivamente.

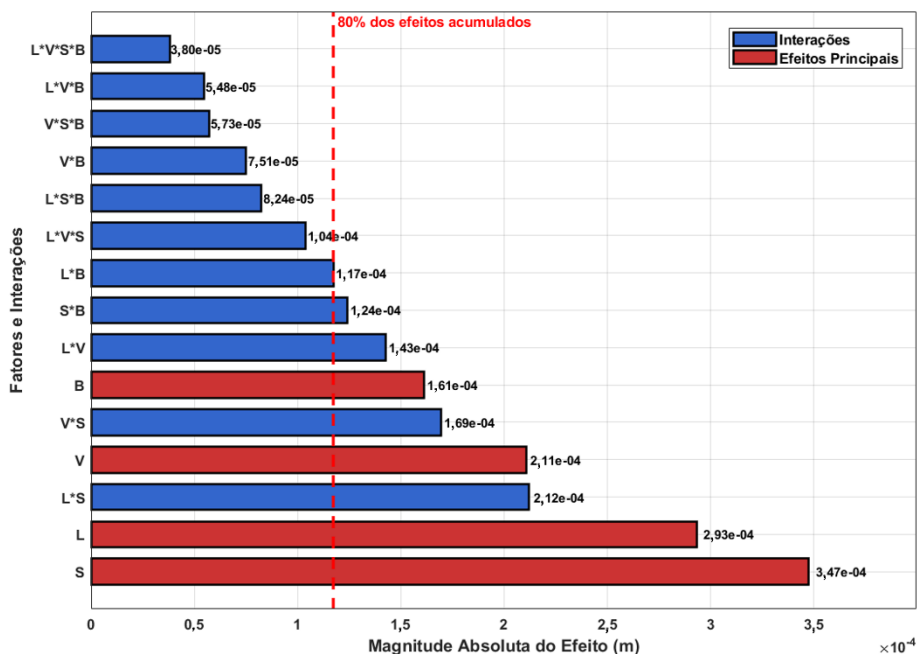


Figura 15. Análise Pareto - Magnitude dos Efeitos para Máximo na Pista.

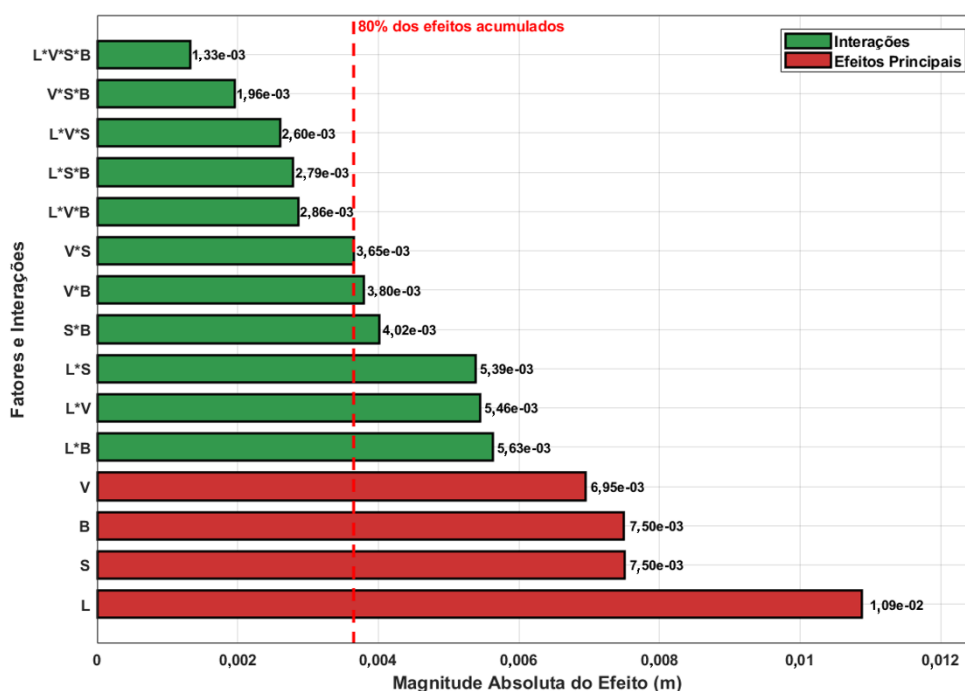


Figura 16. Análise Pareto - Magnitude dos Efeitos para Máximo no Friso.

A análise de interações revelou fenômenos significativos de sinergia entre os fatores investigados. A interação L*S (lateral $\times$ superelevação) apresentou o efeito combinado mais expressivo para o desgaste máximo na pista, com magnitude de +21,2 mm. Este resultado sugere que a coexistência de irregularidades laterais e desvios de superelevação amplifica não-linearmente as forças dinâmicas na interface roda-trilho. Para o friso, a interação L*B (lateral $\times$ bitola) demonstrou o maior efeito sinérgico, atingindo 5,63 mm. Contudo, em ambas as regiões, os efeitos principais individuais superaram em magnitude os efeitos de interação. Esta constatação possui implicações relevantes para estratégias de manutenção, indicando que intervenções focadas em irregularidades específicas podem ser mais eficazes do que abordagens que buscam coordenar múltiplos parâmetros simultaneamente.

A relação entre o número de irregularidades ativas e a severidade do desgaste não seguiu uma tendência linear simples (Figura 17 e Figura 18). A área total de desgaste escalou de 0,388 mm² (0 irregularidades) para 18,8 mm² (4 irregularidades), representando um aumento de aproximadamente duas ordens de grandeza. No entanto, os incrementos marginais foram não-lineares: a transição de 0 para 1 irregularidade elevou a área em aproximadamente 1380% (de 0,388 para 5,75 mm²), enquanto a adição da segunda irregularidade gerou um incremento adicional de 86% (para 10,7 mm²). A terceira e quarta irregularidades produziram incrementos progressivamente menores de 47% e 20%, respectivamente, indicando um claro efeito de saturação. Este padrão de retornos decrescentes sugere a existência de mecanismos de compensação ou limitação física na interação simultânea de múltiplas fontes de excitação.

A distribuição espacial da severidade do desgaste também se alterou qualitativamente. A profundidade máxima de desgaste no friso aumentou de 1,0 mm (0 irregularidades) para 10,6 mm (4 irregularidades), um crescimento de 10,6 vezes. Na pista, o crescimento foi ainda mais pronunciado, de 10,2 para 304 μ m, um fator de



amplificação de, aproximadamente, 29,8 vezes. A inclinação da curva de crescimento da profundidade máxima na pista é consideravelmente maior que a do friso, indicando que a região da pista é mais sensível à adição cumulativa de irregularidades.

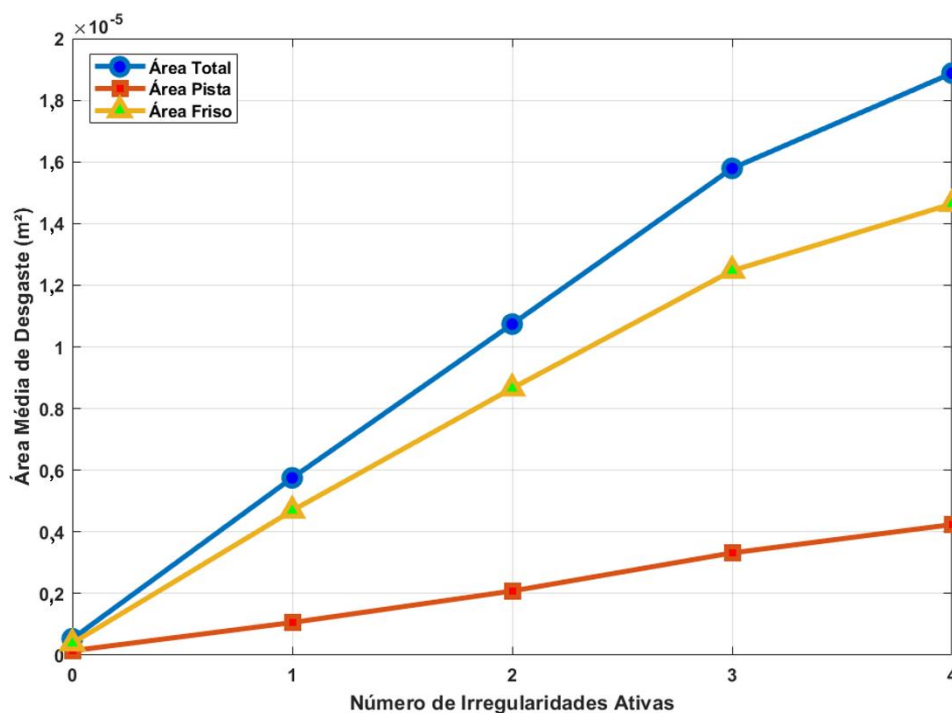


Figura 17. Evolução das Áreas com Número de Irregularidades Ativas.

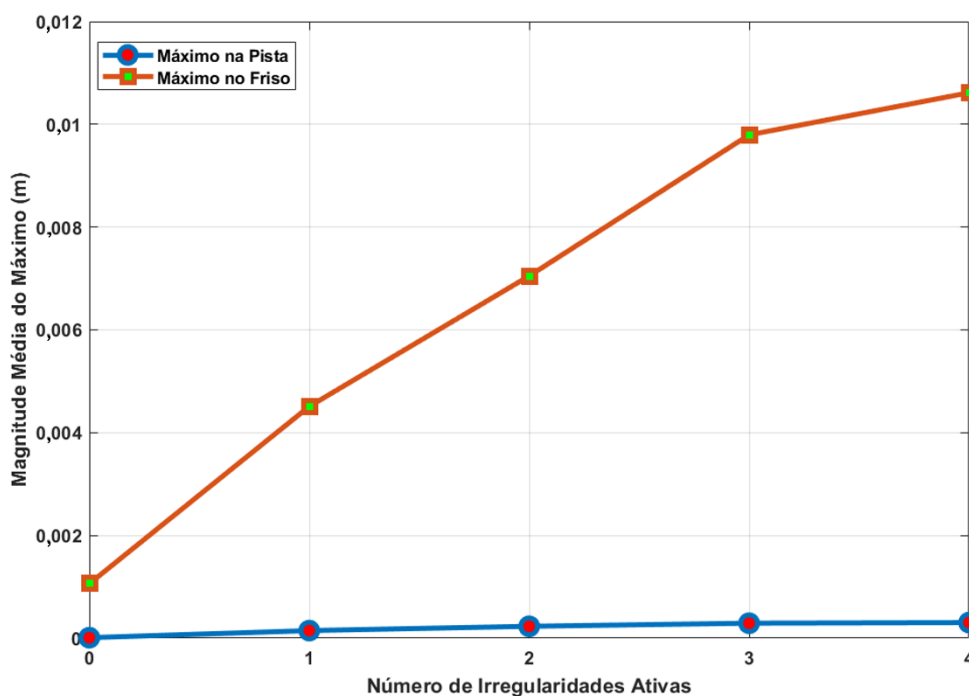


Figura 18. Evolução dos Máximos com Número de Irregularidades Ativas.



A priorização para ações de manutenção (Figura 19) indicou a seguinte ordem de criticidade: 1) irregularidade lateral (L), 2) irregularidade de superelevação (S), 3) irregularidade de bitola (B), 4) irregularidade vertical (V). Esta hierarquia difere significativamente de protocolos baseados em limites absolutos individuais, destacando a importância de abordagens sistêmicas.

A análise de Pareto (Figura 15 e Figura 16) revelou uma hierarquia clara de efeitos para cada região. Para o desgaste máximo na pista, os efeitos principais S (superelevação, $3,47 \times 10^{-4}$ m) e L (lateral, $2,93 \times 10^{-4}$ m) foram os mais influentes, seguidos pela interação de 2ª ordem L*S ($2,12 \times 10^{-4}$ m) e pelo efeito principal V (vertical, $2,11 \times 10^{-4}$ m). Coletivamente, estes quatro efeitos – S, L, L*S e V – respondem pela maior parte da variabilidade observada. Para o desgaste máximo no friso, a dominância é ainda mais pronunciada: o efeito principal L (lateral, $1,09 \times 10^{-2}$ m) é o fator preponderante, com magnitude quase uma ordem de grandeza superior ao segundo colocado, S ($7,50 \times 10^{-3}$ m). A interação L*B ($5,63 \times 10^{-3}$ m) também se destaca. Esta concentração extrema de influência – onde o fator L sozinho é dominante no friso e os fatores S e L governam a pista – confirma a viabilidade de estratégias de monitoramento altamente focadas, priorizando a medição e o controle dessas poucas irregularidades-chave.

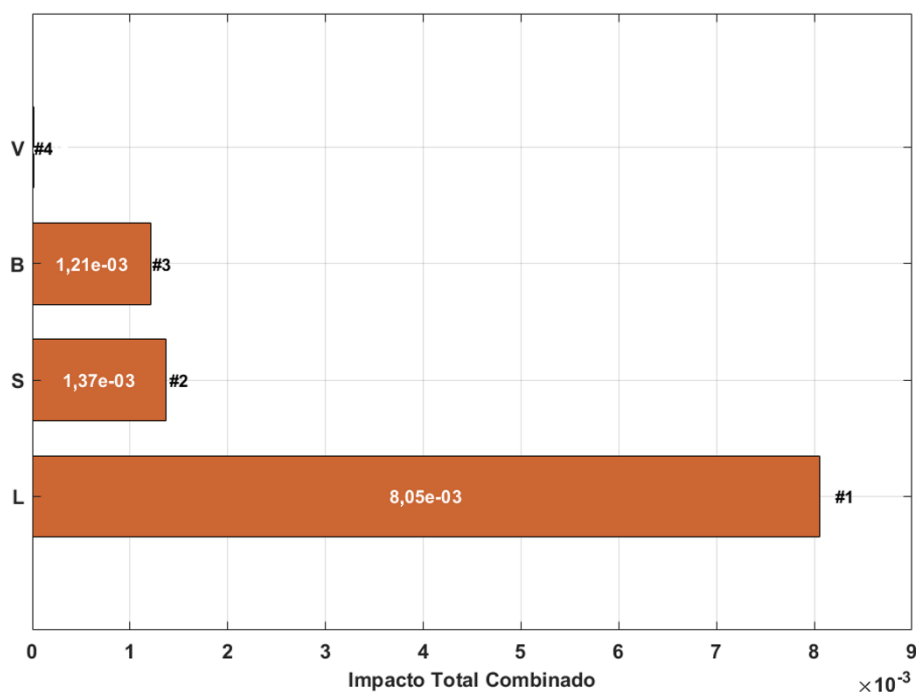


Figura 19. Priorização de Irregularidades para Manutenção (classificação baseada na soma dos valores absolutos dos efeitos principais em todas as variáveis resposta).

Embora o estudo tenha considerado combinações binárias de fatores, irregularidades reais apresentam espectros contínuos de amplitude e frequência. Trabalhos futuros deverão investigar como a severidade relativa das irregularidades modula os efeitos observados. Adicionalmente, a análise considerou apenas condições de carga constante; a inclusão de variações de carga e velocidade pode revelar interações de ordem superior.



A validação experimental em escala real é necessária para confirmar as tendências identificadas, particularmente quanto aos efeitos antagônicos que, se confirmados, poderiam inspirar novas estratégias de gestão de via.

4. CONCLUSÃO

Este estudo realizou uma investigação sistemática, baseada em simulações dinâmicas multicorpos e um plano de experimentos fatorial completo, para quantificar a influência das irregularidades geométricas da via no desgaste de rodas ferroviárias. As principais conclusões são:

- A irregularidade lateral (L) é o fator mais crítico para o desgaste global, apresentando o maior efeito principal na área total de desgaste e sendo dominante na definição da máxima penetração no friso (efeito de $+7,86 \times 10^{-3}$ m). Para a pista, a irregularidade de superelevação (S) é a mais influente ($+1,10 \times 10^{-3}$ m). A irregularidade vertical (V) mostrou efeito marginal no contexto deste estudo.
- Foram identificadas interações significativas, como L*S (pista) e L*B (friso), que amplificam localmente o desgaste. No entanto, a magnitude dessas interações foi consistentemente inferior à dos efeitos principais isolados. Isto indica que, embora combinações específicas de irregularidades possam exacerbar o dano, o controle individual das componentes-chave (L e S) é a estratégia mais eficaz para mitigar o desgaste.
- A relação entre o número de irregularidades ativas e o desgaste não é linear. A primeira irregularidade introduzida causa o maior impacto marginal, com retornos decrescentes para cada irregularidade adicional. Este efeito de saturação sugere a existência de mecanismos dinâmicos de compensação e que modelos muito complexos, com todas as irregularidades, podem não ser necessários para uma estimativa robusta do desgaste.
- A região da pista mostrou-se significativamente mais sensível à acumulação de irregularidades do que o friso, com a profundidade máxima crescendo por um fator de três vezes maior que no friso. Isto reforça a necessidade de critérios de monitoramento e intervenção diferenciados por região do perfil da roda.

Implicações para Prática de Engenharia:

- As atividades de manutenção corretiva e preventiva da via devem priorizar a correção de irregularidades laterais e de superelevação, dada sua influência desproporcional.
- Para fins de predição de desgaste com eficiência computacional, modelos simplificados que incorporem principalmente as irregularidades L e S podem capturar a maior parte da variabilidade do fenômeno, oferecendo um excelente custo-benefício.
- Programas de monitoramento de condição da via podem ser otimizados focando-se na medição contínua e no controle dos limites das irregularidades laterais e de superelevação.

Em síntese, este trabalho fornece uma base quantitativa e uma hierarquia clara para a tomada de decisão em relação ao gerenciamento de irregularidades da via e sua relação com o desgaste das rodas. A abordagem metodológica demonstrada, combinando DoE com MBS, é uma ferramenta poderosa para desacoplar efeitos complexos e orientar



o desenvolvimento de estratégias de manutenção mais inteligentes e econômicas no setor ferroviário. Trabalhos futuros devem buscar a validação experimental dessas conclusões e investigar como a intensidade (classe FRA) e a velocidade operacional modulam os efeitos aqui quantificados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seu agradecimento à Vale S.A. pelo financiamento deste estudo (processo nº 23068.043918/2025-21) e pelo apoio técnico. Também ao CNPq, por apoiar um dos pesquisadores deste trabalho em suas pesquisas (Projeto 303582/2023-5).

6. REFERÊNCIAS

1. BRAGHIN, F.; BRUNI, S.; LEWIS, R. Railway wheel wear. In: LEWIS, R.; OLOFSSON, U. **Wheel–Rail Interface Handbook**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2009. p. 172-210. DOI: 10.1533/9781845696788.1.172
2. BOSSO, N.; MAGELLI, M.; ZAMPIERI, N. Simulation of wheel and rail profile wear: a review of numerical models. **Rail. Eng. Science**, 30, 2022. 403-436. DOI: 10.1007/s40534-022-00279-w
3. PACHECO, P. A. P. et al. Comparison between quasi-static and multibody dynamic simulations for wheel-rail contact analysis. **Multibody System Dynamics**, 2024. DOI: 10.1007/s11044-024-09979-z
4. APEZETXEA, I. S. et al. Modelling stochastic excitations for a fast wear calculation methodology. **Vehicle System Dynamics**, p. 1657-1674, 2020. DOI: 10.1080/00423114.2019.1634275
5. PACHECO, P. A. P. et al. Optimization of Heavy Haul Railway Wheel Profile Based on Rolling Contact Fatigue and Wear Performance. **Wear**, 522, 2023. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204704
6. JENDEL, T. Prediction of wheel profile wear—comparisons with field measurements. **Wear** 253, 2002. 89-99. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00087-X
7. DO, N. T. Evaluating Track Stiffness and Rail Bending Moments using Vertical Track Deflection Measurements Considering the Effects of Track Geometry. **PhD Thesis, Departament of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta**, 2020.
8. ZHU, Z.-H. et al. A combined method for simulating track irregularities with full information and small samples. **Journal of Central South University**, 2023. 3113–3126. DOI: 10.1007/s11771-023-5443-0
9. CHRISTIANSEN, L. E. The Dynamics of a Railway Vehicle on a Disturbed Track: Modelling of lateral irregularities. **Tese de mestrado, Technical University of Denmark**, 2001.
10. LESTOILLE, N. Stochastic model of high-speed train dynamics for the prediction of long-time evolution of the track irregularities, 2015.
11. BRAGANÇA, C. et al. Drive-by Methodologies Applied to Railway Infrastructure Subsystems: A Literature Review—Part II: Track and Vehicle. **Appl. Sci.**, 2023. DOI: 10.3390/app13126982



12. CORRÊA, P. H. A. et al. Effect of primary suspension and friction wedge maintenance. **Wear**, 524, 2023. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204748
13. PACHECO, P. A. P. et al. The effectiveness of different wear indicators in quantifying wear on railway wheels of freight wagons. **Railway Engineering Science**, 2024. DOI: 10.1007/s40534-024-00334-8
14. PACHECO, P. et al. Effect of transition functions on the dynamic behavior of heavy-haul. **20th International Wheelset Congress**, Chicago, 2023.
15. PACHECO, P. A. P. Desenvolvimento de um Indicador Global para o consumo de energia dos vagões ferroviários de alta carga. **Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Mecânica**, 2025.
16. PACHECO, P. A. P. et al. **Wear and fatigue-oriented wheel profile optimized for heavy haul**. VI Simpósio de Engenharia Ferroviária. Campinas: [s.n.]. 2023. DOI: 10.17648/sef-2023-165737
17. AYASSE, J. B.; CHOLLET, H. Determination of the wheel rail contact patch in semi-Hertzian conditions. **Vehicle System Dynamics**, 43(3), 2005. 161–172. DOI: 10.1080/00423110412331327193
18. SIMPACK. Contact, Normal Force Tab. In: _____ **Simpack User Assistance**. [S.l.]: Dassault Syst`emes Simulia Corp., 2022.
19. PACHECO, P. A. D. P. et al. Algorithm-based strategy to define an equivalent railway track for wear simulations. **Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit**, 2025. 1-12. DOI: 10.1177/09544097251320687



COMPARATIVE EVALUATION OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT TRACK IRREGULARITY ON WHEEL WEAR PROFILE.

ABSTRACT

Wheel profile wear is a critical phenomenon in railway engineering, directly impacting safety, passenger comfort, and maintenance costs. This paper presents a systematic and quantitative analysis of the individual and combined influence of the four main track geometric irregularities – lateral (L), vertical (V), roll/superelevation (S), and gauge (B) – on wheel wear rate and distribution. The methodology is based on multibody dynamic simulations (MBS) of a heavy-haul freight wagon, using a validated equivalent track model of a 505 km track of the Vitória Minas Railway (EFVM) and irregularities generated by Power Spectral Density (PSD) of FRA class 4. A full factorial 2^4 Design of Experiments (DoE) was employed to isolate and quantify main effects and interactions. Results revealed that lateral irregularity (L) is the dominant factor for total wear and, especially, for maximum wear depth on the flange, with an effect of $+7.86 \times 10^{-3}$ m. On the tread, roll/superelevation irregularity (S) exerted the greatest influence ($+1.10 \times 10^{-3}$ m). Interaction analysis identified significant synergies, such as L*S for the tread ($+2.12 \times 10^{-4}$ m) and L*B for the flange ($+5.63 \times 10^{-3}$ m). However, main effects outweighed interaction effects in magnitude. A non-linear saturation behavior was also observed: the addition of the first irregularity caused the largest impact, with diminishing returns for subsequent ones. It is concluded that maintenance and monitoring strategies should prioritize the control of lateral and superelevation irregularities, and that simplified predictive models focusing on these key components can offer an effective balance between accuracy and computational cost.

Keywords: *Wheel wear, Track irregularities, Multibody Simulation (MBS), Main Effects Analysis, Vehicle-Track interaction.*