

Uma metodologia estatística para redução do desgaste em trilhos ferroviários e sua comparação com o desgaste real

Larissa Fernandes Nunes¹, larissa.nunes@mrs.com.br, Orcid 0000-0001-9337-9408

Luiz Antônio Silveira Lopes¹, laslopes@ime.eb.br laslopes@ime.eb.br, Orcid 0000-0002-2163-9204

Luiz Paulo Brandao¹, brandao@ime.eb.br, Orcid 0000-0002-2623-648X

Wellington Luiz Pereira², wellington.pereira@mrs.com.br, Orcid 0009-0000-6867-6822

João Carlos De Serpa², joao.serpa@mrs.com.br, Orcid 0009-0004-0110-698X

¹Instituto Militar de Engenharia

²MRS Logística

RESUMO: Os trilhos ferroviários representam um dos ativos mais dispendiosos para as ferrovias, e constantes estudos visam prolongar sua vida útil. Este trabalho propôs equações para W_1 , W_2 e W_3 (variação de dimensões do boleto do trilho na vertical, horizontal e com inclinação de 45°) para entender o desgaste. Usando dados reais, as equações foram desenvolvidas e aplicadas a um trilho com oito anos de uso, revelando diferenças significativas entre os valores medidos e esperados. Essa discrepância pode ser atribuída às variações entre os trechos ferroviários e ao modelo estatístico utilizado. Sugere-se que uma abordagem mais detalhada considere características individuais de cada trecho e variáveis adicionais. Isso destaca a necessidade de uma análise personalizada do desgaste dos trilhos, levando em conta a diversidade das condições ao longo da ferrovia.

PALAVRAS-CHAVE: Trilho ferroviário. Projeção de vida útil;. Regressão linear simples. Vida útil em serviço. Posições de desgaste.

ABSTRACT: Railway tracks represent one of the most expensive assets for railways, and constant studies aim to extend their useful life. This work proposed equations for W_1 , W_2 , and W_3 (variation of rail billet dimensions vertically, horizontally, and with an inclination of 45°) to understand wear and tear. Using real data, the equations were developed and applied to an eight-year-old rail, revealing significant differences between measured and expected values. This discrepancy can be attributed to variations between railway sections and the statistical model used. It is suggested that a more detailed approach consider individual characteristics of each section and additional variables. This highlights the need for personalized analysis of track wear, considering the diversity of conditions along the railway.

KEYWORDS: Railway track. Useful life projection. Simple linear regression. Service life. Wear and tear positions.

1. Introdução

Os trilhos representam um dos componentes de maior valor no setor ferroviário brasileiro, atribuído principalmente à natureza de seu material, ao complexo processo de fabricação e à falta de produção nacional. Consequentemente, estender a vida útil desse ativo é uma prioridade para as empresas ferroviárias, visando minimizar e adiar custos adicionais. Para atingir esse objetivo, práticas de manutenção preventiva são empregadas com o intuito de diminuir o desgaste e prevenir o aparecimento de *Rolling Contact Fatigue* (RCF).

O desgaste dos trilhos é definido pela redução da área da seção transversal ao longo de seu período de utilização, o que gera um efeito direto no contato

roda-trilho. Esse processo resulta na alteração das propriedades mecânicas do material, o que pode afetar adversamente a dinâmica veicular ferroviária, comprometendo a confiabilidade e segurança da via permanente [1-3].

O desgaste dos trilhos ferroviários é influenciado por uma variedade de fatores, entre eles:

1. Carga por eixo: Estudos demonstram a relevância da carga por eixo na taxa de desgaste dos trilhos [4; 5; 6];
2. Localização do trilho: A posição do trilho, como em túneis e curvas, impacta seu desgaste [6];
3. Raio de curvatura da via: O raio de curvatura influencia diretamente o desgaste dos trilhos [7];
4. Geometria da via: A configuração da via ferroviária é um fator crítico [8];

5. Velocidade das composições: A velocidade com que os trens operam afeta o desgaste dos trilhos [3];
6. Propriedades metalúrgicas do trilho: As características do material do trilho são determinantes [6];
7. Dinâmica do contato roda-trilho: A interação entre a roda e o trilho é crucial para entender o desgaste [9];
8. Coeficiente de atrito: Este fator é essencial para compreender as forças em jogo [9];
9. Perfil da roda e do trilho: A interação do perfil do trilho e da roda influencia diretamente no desgaste devido à elipse de contato [10].

Esses estudos realçam a complexidade e a multidimensionalidade do fenômeno de desgaste em trilhos ferroviários, sublinhando a importância de uma abordagem holística na manutenção e no traçado das ferrovias para minimizar tais efeitos.

O desgaste dos trilhos ferroviários geralmente se manifesta de duas formas principais: vertical e horizontal/lateral. O desgaste vertical é um fenômeno amplamente observado, resultante do atrito, da abrasão e da carga imposta pelas rodas de vagões e locomotivas. Esse tipo de desgaste leva à redução progressiva da altura do trilho, comprometendo potencialmente a estabilidade da via ferroviária [11].

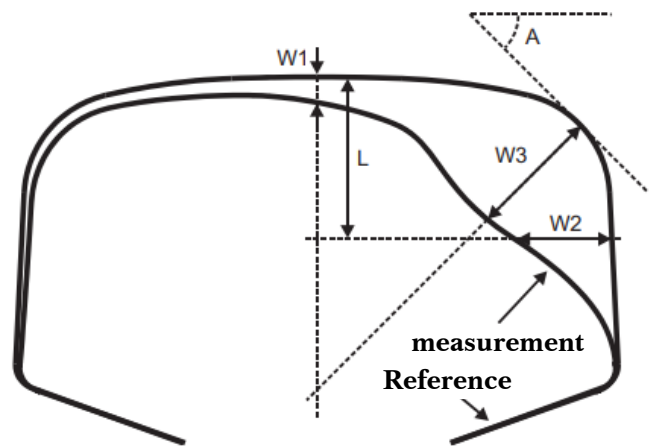
Por outro lado, o desgaste horizontal, ou lateral, afeta as faces laterais dos trilhos, particularmente na parte superior e na base. Esse desgaste é induzido principalmente por forças horizontais geradas, por exemplo, quando os trens circulam em curvas [11].

Para a análise detalhada do desgaste em trilhos, um estudo propôs um método de medição que identifica três áreas críticas, denominadas **W1**, **W2** e **W3**. **W1** corresponde à alteração do perfil vertical na parte superior do trilho. **W2** refere-se à variação horizontal, enquanto **W3** indica a mudança medida em um ângulo de 45° [12]. A ilustração de um trilho, conforme apresentada na Figura 1, esclarece a localização exata de cada um desses parâmetros de medição, oferecendo uma visão clara dos pontos críticos para a avaliação do desgaste.

Os defeitos de RCF surgem de interações cíclicas entre as rodas dos trens e os trilhos durante o transporte. Essas interações resultam em forças de cisalhamento que criam defeitos superficiais tanto

nos trilhos quanto nas rodas. A camada superficial afetada por esses esforços sofre uma deformação plástica, resultando em um aumento de dureza e alterações na microestrutura do material, devido ao encruamento. Esse processo pode levar ao surgimento de trincas superficiais que, se não forem devidamente tratadas, podem evoluir e causar a falha do componente.

Figura 1 - Parâmetros de análise do desgaste.



Fonte: Adaptado [13].

O RCF é caracterizado por padrões específicos de falhas que se manifestam como não conformidades na superfície dos trilhos. Entre as falhas típicas associadas à fadiga de contato, destacam-se:

- *Head checks*: Essas são pequenas trincas que aparecem no canto da bitola do trilho, dispostas aproximadamente a 45° em relação à direção de rolamento, resultantes da tensão cíclica na superfície [14];
- *Shelling*: Conforme descrito por Rice [apud 15], este fenômeno ocorre quando trincas do tipo *head check* se aprofundam e se expandem no interior do trilho, alcançando dimensões significativas. Isso pode levar à escamação do material do trilho, um processo conhecido como *shelling*;
- *Squats*: São caracterizados pelo desprendimento de material da superfície do trilho, formando cavidades. Este tipo de defeito é frequentemente associado ao estresse localizado e ao desgaste acelerado [14].

Essas falhas evidenciam a importância de práticas de manutenção preventiva e monitoramento contínuo da infraestrutura ferroviária, visando mitigar os efeitos prejudiciais do RCF e assegurar a segurança e a longevidade do sistema ferroviário.

A adoção de estratégias como lubrificação no ponto de contato entre roda e trilho e o esmerilhamento representam métodos eficazes na prevenção e atenuação dos efeitos do desgaste e do RCF [16].

A aplicação de lubrificantes desempenha um papel crucial na redução e otimização do atrito no contato roda-trilho, contribuindo significativamente para a diminuição do desgaste desses componentes críticos. Existem principalmente dois tipos de lubrificantes empregados para esse fim, sendo eles:

- Modificadores de atrito: São aplicados na parte superior do trilho com o objetivo de ajustar o nível de atrito entre a roda e o trilho, minimizando assim o desgaste vertical. A utilização de modificadores de atrito ajuda a equilibrar a interação entre as rodas e os trilhos, prolongando a vida útil deles [17];
- Graxa: É aplicada nas laterais dos trilhos, particularmente em curvas de raio apertado. Sua função é mitigar o desgaste horizontal ou lateral, protegendo os trilhos contra os efeitos abrasivos das forças laterais exercidas durante a passagem dos trens [18].

Estudos e práticas no campo demonstram a eficácia dessas abordagens na manutenção da integridade dos sistemas ferroviários [19; 20]. A escolha apropriada e a aplicação cuidadosa de lubrificantes são fundamentais para garantir a eficiência dessas medidas preventivas, destacando-se como componentes vitais na gestão da manutenção ferroviária.

O esmerilhamento de trilhos é uma técnica de manutenção preventiva crucial, destinada à remoção de camadas superficiais que foram deformadas devido ao tráfego constante de trens. Este procedimento é essencial para restaurar a geometria ideal do trilho e melhorar a interação entre a roda e o trilho, eliminando defeitos como o RCF que podem comprometer a estabilidade dos trens durante a circulação [21; 22].

Além do esmerilhamento e da lubrificação, a prática de projetar e estimar o momento adequado para a substituição dos trilhos em serviço emerge como uma estratégia proativa significativa. Esta abordagem visa prever a vida útil restante dos trilhos, permitindo planejar com antecedência as substituições necessárias para manter a segurança e eficiência operacional da via férrea. Tal estimativa é fundamental para a gestão de ativos ferroviários, assegurando que as operações sejam conduzidas de forma segura e econômica, minimizando interrupções e maximizando a longevidade da infraestrutura.

Este estudo teve como objetivo comparar a durabilidade do trilho ferroviário TR-68 em termos de desgaste, utilizando tanto a projeção baseada em métodos estatísticos – especificamente a correlação linear de Pearson e a regressão linear simples – com base em dados concretos, quanto a análise da seção transversal de um trilho retirado de operação após oito anos devido a uma fratura. Os resultados revelaram que não é viável definir uma equação única para cada posição de desgaste, capaz de determinar a vida útil do trilho em toda a extensão de uma ferrovia. Isso se deve à presença de variáveis significativas, como as características do terreno, o volume e tipo de carga transportada – e a velocidade das composições ferroviárias que são específicas para cada trecho e impactam de maneira significativa a previsão da durabilidade do ativo. Além disso, o estudo sugere que a realidade complexa dos trilhos exige a consideração de um conjunto mais amplo de variáveis, indicando que a regressão linear simples pode não ser a metodologia mais precisa para essa finalidade.

2. Metodologia estatística para previsão de vida útil dos trilhos

Inicialmente, este estudo focou a análise do nível de correlação entre o desgaste dos trilhos e o volume de carga transportada, expresso em Milhões de Toneladas Brutas Transportadas (MTBT). Para tal, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r), determinado conforme a Equação 1, visando quantificar o grau de associação entre essas duas variáveis.

$$r = \frac{n \cdot \sum x_i y_i - (\sum x_i) \cdot (\sum y_i)}{\sqrt{[n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2] \cdot [n(\sum y_i^2) - \sum y_i^2]}} \quad (1)$$

Neste contexto:

n representa o número total de pares de dados analisados;

x_i e **y_i** correspondem, respectivamente, às variáveis em estudo.

O propósito de examinar o coeficiente de correlação de Pearson (**r**) é determinar o nível de relação linear entre as duas variáveis em questão, **x_i** e **y_i** [23].

Ao interpretar o valor de **r** calculado pela Equação 1, é possível extrair diversas inferências, as quais são detalhadamente apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Interpretação do valor obtido para o coeficiente de Pearson (r).

Coefficiente de correlação de Pearson (r)	Correlação linear
r = 1	Perfeita positiva
0,8 ≤ r < 1	Forte positiva
0,5 ≤ r < 0,8	Moderada positiva
0,1 ≤ r < 0,5	Fraca positiva
0 ≤ r < 0,1	Ínfima positiva
0	Nula
-0,1 ≤ r < 0	Ínfima negativa
-0,5 ≤ r < -0,1	Fraca negativa
-0,8 ≤ r < -0,5	Moderada negativa
-1 ≤ r < -0,8	Forte negativa
r = -1	Perfeita negativa

Fonte: adaptado [14].

Quando o coeficiente de correlação de Pearson (**r**) é igual a 0, isso indica uma ausência de correlação linear entre as variáveis analisadas. Por outro lado, valores de **r** próximos a 1 ou -1 sugerem uma correlação linear forte entre as variáveis, seja ela positiva ou negativa, respectivamente. Uma correlação positi-

va implica que, à medida que uma variável aumenta, a outra também aumenta, enquanto uma correlação negativa indica que o aumento de uma variável resulta na diminuição da outra. Um valor de **r** igual a 1 ou -1 denota uma correlação linear perfeita, seja ela totalmente direta ou inversa.

Além da análise numérica, a relação entre as variáveis pode ser visualizada graficamente por meio de um gráfico de dispersão. Uma disposição das variáveis que se alinhe estreitamente com uma linha reta no gráfico indica uma correlação linear forte (com o coeficiente de Pearson próximo de 1). Em contraste, uma distribuição aleatória das variáveis no gráfico sinaliza uma correlação linear fraca (coeficiente de Pearson próximo de 0) [23].

Com base no coeficiente de Pearson e na observação do gráfico de dispersão, o modelo de regressão linear simples é empregado para elucidar a relação entre as duas variáveis em foco. Este modelo também foi utilizado, neste trabalho, para fazer projeções sobre a vida útil dos trilhos, buscando fornecer uma ferramenta simples para previsões futuras baseadas em dados históricos.

A regressão linear simples é um método estatístico que visa estabelecer uma equação matemática para descrever a relação entre duas variáveis específicas [25; 26]. Essas variáveis são classificadas como:

- Variável dependente (**Y**), também conhecida como variável resposta, que é a variável cujo comportamento se deseja prever ou entender melhor;
- Variável independente (**X**), também chamada de variável explicativa, que é a variável utilizada para fazer as previsões ou explicar as variações na variável dependente.

O modelo teórico para construir essa equação linear simples é delineado conforme a Equação 2 [27]. Este modelo fornece a base para calcular a relação linear entre as variáveis, permitindo previsões e análises fundamentadas sobre como uma variável pode afetar a outra.

$$Y = aX + \beta + \epsilon_i \quad (2)$$

Em que:

X, Y: variáveis em análise;

α e β : parâmetros desconhecidos;
 ϵ_i : erro aleatório.

Os valores de α e β podem ser obtidos utilizando as equações 3 e 4 [27].

$$\beta = \frac{n \cdot \sum xi \cdot yi - (\sum xi) \cdot \sum yi}{n \cdot (\sum xi^2) - (\sum xi)^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \bar{y} - \beta \cdot \bar{x} \quad (4)$$

Em que, \bar{x} é a média dos valores de \mathbf{x}_i e \bar{y} é a média dos valores de \mathbf{y}_i .

3. Coleta de dados

Os dados empregados nesta análise estatística, abrangendo correlação linear e regressão linear simples, foram coletados no período entre 2019 e 2022. A pesquisa focou o trilho de perfil Vignole TR-68, utilizando medidas de desgaste específicas (**W1**, **W2** e **W3**). Para a mensuração do desgaste, foi empregado o equipamento MiniProf, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Medição em campo com o equipamento mini prof.



Fonte: Autor.

Os dados compilados para esta pesquisa refletem características específicas do sistema ferroviário estudado, incluindo:

- MTBT anual estimado: ~ 150 ;
- Carga por eixo transportado: 32 toneladas;
- Fluxo: *Heavy Haul* carregado;
- Posição de instalação: Trilho externo em curva de raio médio.

Adicionalmente, a investigação contemplou a análise de uma amostra de trilho que foi substituída devido a uma fratura após oito anos de uso contínuo. A Figura 3 ilustra a seção transversal do trilho afetado, exibindo sinais iniciais de trinca por *shelling* e subsequente progressão por fadiga.

Figura 3 - Seção transversal da amostra de trilho utilizada nesta pesquisa.



Fonte: Autor.

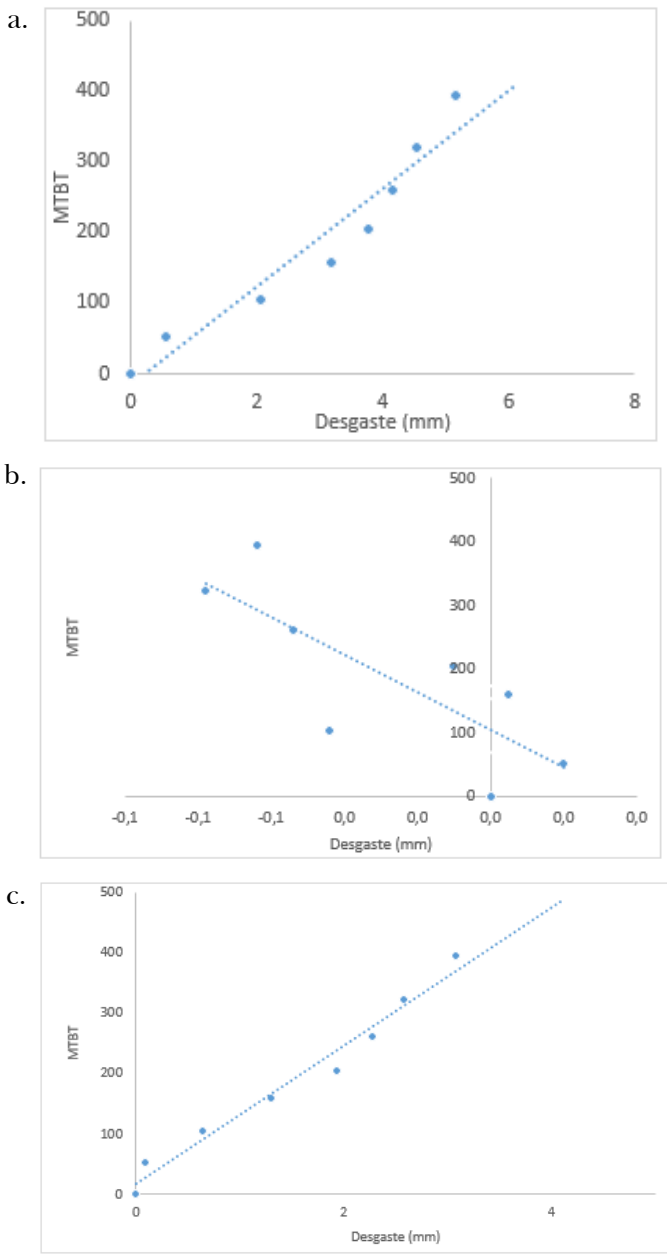
A seguir, encontram-se os dados dessa amostra:

- MTBT anual estimado: ~ 50 ;
- Carga por eixo transportado: 32 toneladas;
- Fluxo: *Heavy Haul* carregado;
- Posição de instalação: Trilho externo em curva de raio apertado.

4. Resultados e discussão

Os gráficos de dispersão foram plotados utilizando o Excel, incluindo linhas de tendência, para examinar possíveis relações visuais entre o MTBT e o desgaste nos trilhos ferroviários, considerando cada posição de desgaste avaliada, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - gráficos de dispersão com linhas de tendência para as posições (a) w1, (b) w2 e (c) w3.



Fonte: Autor.

Nota-se que, nas posições **W1** e **W3** (Figuras 4a e 4c), há claramente uma relação linear entre as duas variáveis. Em contraste, para a posição **W2** (Figura 4b), conforme os dados coletados em campo, o desgaste observado foi quase inexistente, resultando em valores negativos no MiniProf. Estudos demonstraram que a aplicação do terceiro corpo no contato

roda trilha pode chegar a eliminar o desgaste lateral gerado em curvas com raios entre 437 e 159 m [16].

Posteriormente, calculou-se o grau de associação entre as variáveis, determinando-se o valor do coeficiente de correlação de Pearson (**r**), o coeficiente de determinação (**r²**) e o coeficiente de determinação ajustado, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores dos coeficientes de Person (**r**), determinação (**r²**) e determinação ajustado para as três posições de desgaste.

Posição	r ²	r	r ² ajustado
W1	0,9287035	0,9636926	0,916820753
W2	0,624447	0,7902196	0,561854795
W3	0,9746352	0,9872361	0,970407679

Fonte: Autor.

Ao analisar os coeficientes de correlação de Pearson (**r**), de determinação (**r²**) e de determinação ajustado apresentados na Tabela 2, nota-se que os valores para **W1** e **W3** são muito próximos de 1, sugerindo uma forte e positiva correlação linear entre as variáveis (conforme Tabela 1). Por outro lado, para **W2**, observa-se uma correlação linear positiva de intensidade moderada (conforme Tabela 1), o que está em consonância com o padrão observado no gráfico de dispersão para essa posição (Figura 4b). Isso significa que, para a posição **W2**, aproximadamente 79% da variação na variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes incluídas no modelo. Para as posições **W1** e **W3**, essa explicabilidade é superior, ultrapassando 90%.

Os valores estimados para os parâmetros α e λ obtidos com apoio do Excel, derivados do modelo de regressão linear, bem como o erro padrão associado, estão detalhadamente descritos na Tabela 3.

As equações associadas ao modelo de regressão ajustado, obtidas com apoio do Excel, conforme especificado na Tabela 3, são as seguintes:

$$W1, \quad MTBT = 69,279Desgaste - 15,485 \quad (5)$$

$$W2, \quad MTBT = -2941,5Desgaste + 104,32 \quad (6)$$

$$W3, \quad MTBT = 114,67Desgaste + 16,545 \quad (7)$$

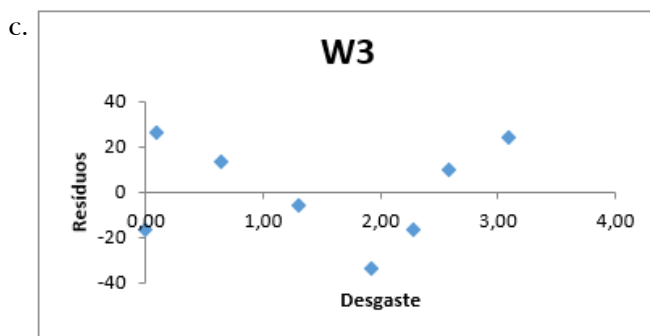
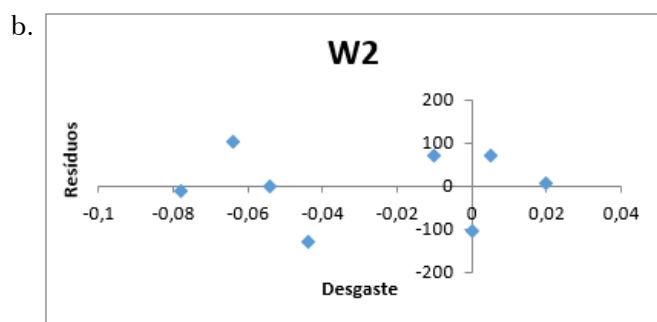
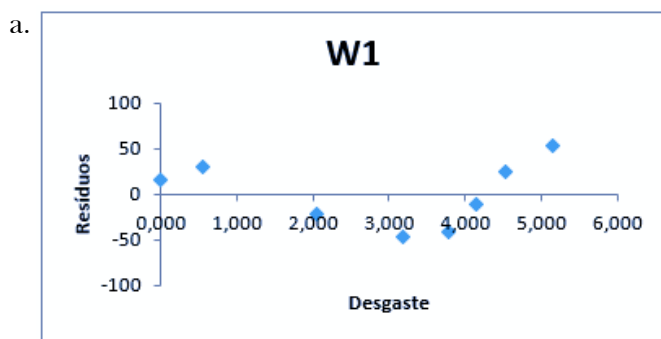
Tabela 3 - Coeficientes de regressão linear.

	Modelo	Coeficientes	Erro padrão
W1	MTBT	-15,485	26,736
	Desgaste	69,279	7,8365
W2	MTBT	104,32	41,068
	Desgaste	-2941,5	931,29
W3	MTBT	16,545	41,068
	Desgaste	114,675	931,29

Fonte: Autor.

A Figura 5 exibe os gráficos de resíduos em relação ao desgaste do trilho. Resíduos são as diferenças entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo de regressão. A análise desses resultados pode fornecer insights valiosos sobre a adequação do modelo aos dados reais [28].

Figura 5 - Gráficos de resíduos das três posições de desgaste em análise, sendo (a) referente a W1, (b) referente a W2 e (c) referente a W3.



Fonte: Autor.

Analisando os gráficos dos resíduos, verifica-se que eles têm uma distribuição assimétrica. Sendo que os gráficos referentes às posições W1 e W3 (Figuras 5a e 5c, respectivamente) apresentam uma assimetria positiva, enquanto o gráfico para a posição W2 (Figura 5b) tem uma assimetria negativa.

A presença de assimetria nos resíduos pode indicar que o modelo de regressão linear não é ideal para descrever a relação entre as variáveis ou que não há uma linearidade ou heterocedasticidade não capturada pelo modelo. Isso pode apontar para a necessidade de ajustes no modelo, como a inclusão de termos não lineares, transformações de variáveis ou consideração de outras formas de modelagem [28].

Após a análise dos resíduos, verificou-se os resultados da ANOVA (p-valor) para cada uma das posições, sendo eles apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados da ANOVA.

Variável	p-valor
W1	0,0001
W2	0,0196
W3	5,15E-06

Fonte: Autor.

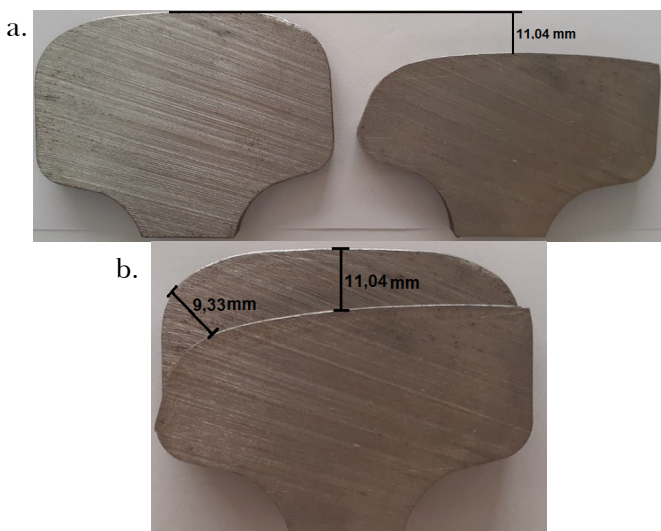
Para valores de p-valor acima de 0,050, não dispomos de evidências que sustentem a afirmação de que o modelo de regressão linear seja significativo para explicar a variável de interesse, indicando que as variáveis independentes não exercem influência sobre a variável dependente. No entanto, se o p-valor for

$\leq 0,050$, podemos inferir que pelo menos uma das variáveis do modelo é relevante para explicar a variável dependente, ou seja, há influência de pelo menos uma variável independente na variável dependente [28]. Nesse contexto, ao examinar a Tabela 4, observamos que todos os p-valores são inferiores a 0,05. Logo, concluímos que a regressão é estatisticamente significativa, indicando a importância do modelo de regressão linear para explicar a variável dependente.

Utilizando as Equações 5 e 7 e excluindo os dados referentes à posição **W2** devido à baixa taxa de desgaste observada durante o período de análise – conforme evidenciado na Figura 4b –, realizou-se o cálculo estimado para o perfil de desgaste do trilho ferroviário que esteve em operação por um período de oito anos (Figura 3). Os resultados indicaram um desgaste estimado de 5,82 mm na posição **W1** e 3,24 mm na posição **W3**.

Posteriormente, procedeu-se à medição do desgaste real experimentado por esse trilho utilizando um paquímetro e um transferidor para a obtenção dos valores de **W1** e **W3**, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - (a) Perfil do trilho novo e usado lado a lado e (b) perfil do trilho novo e usado sobrepostos com as devidas medidas de **W1** e **W3**.



Fonte: Autor.

Ao avaliar os valores calculados para **W1** (5,82 mm) e **W3** (3,24 mm) usando as Equações 5 e 7 e compará-los com os valores reais registrados para o trilho em

serviço (**W1** = 11,04 mm e **W3** = 9,33 mm), é possível observar uma considerável discrepância. Essa disparidade pode ser atribuída à localização específica de cada trilho na via férrea. O trecho utilizado para derivar a equação apresenta uma curva com raio médio superior a 900 m e aproximadamente 12 MTBT mensais. Em contraste, a amostra que forneceu os valores reais de **W1** e **W3** (Figura 3) estava instalada em um trecho com curva de raio mais apertado, inferior a 250 m e aproximadamente 4 MTBT mensais. Além das divergências no projeto geométrico da via, existe uma significativa disparidade no volume de carga transportada.

No entanto, apesar da discrepância nos valores absolutos encontrados, os valores relativos mantiveram-se consistentes com os dados reais, ou seja, **W1** > **W3**.

Assim, constata-se que, nesse caso, uma única equação baseada na regressão linear simples para cada posição de análise (**W1**, **W2** e **W3**) é inadequada para descrever o comportamento de toda a ferrovia em estudo. O mais indicado seria obtermos equações utilizando a metodologia de regressão multivariável que levasse em consideração diversos parâmetros, como raio de curvatura, MTBT, rampa, lubrificação. Adicionalmente, devido às particularidades presentes em cada seção da ferrovia, seria aconselhável apresentar equações específicas para cada região, considerando suas características individuais.

É relevante destacar que as metodologias relacionadas a modificações no contato roda-trilho como alterações nos perfis da roda e do trilho, a aplicação de modificadores de atrito e o uso de graxa não foram incluídos nos cálculos estatísticos.

5. Conclusão

- Os valores medidos de desgaste do trilho que apresentou fratura foram superiores aos calculados para o mesmo trilho usando as equações desenvolvidas neste estudo. No entanto, a correlação indicando que **W1** é maior que **W3** foi consistentemente observada;
- A abordagem de regressão linear simples adotada não conseguiu capturar integralmente todos os fatores presentes na infraestrutura ferroviária

que afetam o desgaste do trilho. Portanto, há uma necessidade de refinamento do modelo por meio da inclusão de outras variáveis que sejam significativas para explicar o fenômeno observado;

- O desgaste está intrinsecamente vinculado às condições do meio em que o ativo está inserido. Logo, a discrepância entre os valores medidos no trilho fraturado e aqueles obtidos pela equação

pode ser atribuída, em parte, à localização dos trilhos. O trilho fraturado encontrava-se em um ambiente com condições completamente distintas daquelas do trilho utilizado como referência para a formulação das equações. Isso pode indicar que uma mesma equação, para cada uma das posições de desgaste (**W1**, **W2** e **W3**), não é adequada para descrever toda uma ferrovia de forma detalhada.

Referências

- [1] Butini, E. *et al.* Development and validation of wear models by using innovative three-dimensional laser scanners. **Advances in Mechanical Engineering**, Thousand Oaks, v. 11, n. 8, p. 1687814019870402, 2019.
- [2] Jin X. *et al.* A numerical method for prediction of curved rail wear. **Multibody Syst Dyn**, Berlin, v. 18, p. 531-557, 2007.
- [3] Meghoo A.; Loendersloot R.; Tinga T. Rail wear and remaining life prediction using meta-models. **International Journal of Rail Transportation**, Abingdon, v. 8, n. 1, p. 1-26, 2019.
- [4] Westgeest F. P.; Dekker R.; Fischer R. H. Predicting rail geometry deterioration by regression models. *In*: Benenguer C.; Grall A.; Soares, C. G. (Eds.). **Advances in safety, reliability and risk management**. London: CRC Press. p. 926-933.
- [5] Wang J. *et al.* Study on rail profile optimization based on the nonlinear relationship between profile and wear rate. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], 2017.
- [6] AL-Juboori, A. *et al.* Evolution of rail surface degradation in the tunnel: the role of water on squat growth under service conditions. **Engineering fracture mechanics**, Amsterdam, v. 209, p. 32-47, 2019.
- [7] Ahac M.; Lakus'ic' S. Track gauge degradation modelling on small urban rail networks: zagreb tram system case study. *In*: Yaghoubi, H. (Ed.). **Urban transport systems**. Rijeka: InTech, 2017. p. 1-20.
- [8] Soleimani H.; Moavenian M. Tribological aspects of wheel-rail contact: a review of wear mechanisms and effective factors on rolling contact fatigue. **Urban Rail Transit**, Berlin, v. 3, n. 4, p. 227-237, 2017.
- [9] Li, Z. *et al.* An investigation into the causes of squats – correlation analysis and numerical modeling. **Wear**, Amsterdam, v. 265, n. 9-10, p. 1349-1355, 2008.
- [10] Zoeteman, A.; Dollevoet, R.; Li, Z. Dutch research results on wheel/rail interface management: 2001–2013 and beyond. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, Thousand Oaks, v. 228, n. 6, p. 642-651, 2014.
- [11] Sadeghi J.; Akbari B. Field investigation on effects of railway track geometric parameters on rail wear. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, Berlin, v. 7, n. 11, p. 1846-1855, 2006.
- [12] Olofsson, U.; Telliskivi, T. Wear, plastic deformation and friction of two rail steels – a full-scale test and a laboratory study. **Wear**, Amsterdam, v. 254, n. 1-2, p. 80-93, 2003.
- [13] Stock, R.; Pippan, R. RCF and wear in theory and practice—The influence of rail grade on wear and RCF. **Wear**, Amsterdam, v. 271, n. 1-2, p. 125-133, 2011.
- [14] Grassie, S. Fatigue failure is often the hidden hazard. **International Railway Journal**, Falmouth, v. 37, n. 2, 1997.
- [15] Porcaro, R. R. Efeito da soldagem elétrica por centelhamento na microestrutura, propriedades mecânicas e resistência à fadiga de um aço para trilhos ferroviários - análise experimental e numérica. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Ouro Preto, 2019.
- [16] Sroba, P. *et al.* The evolution of rail grinding on Canadian Pacific Railway to address deep seated shells in 100% effective lubrication territories. *In*: World Congress on Railway Research, Montreal, Quebec, Canada. 2006, Paris. **Anais [...]**. Paris: International Union of Railways, 2006.
- [17] Jakob Oertli, S. B. B. **Combating Curve Squeal Phase II**. Paris: International Union of Railways, 2005.
- [18] Hardwick, C.; Lewis, R.; Eadie, D. T. Wheel and rail wear—Understanding the effects of water and grease. **Wear**, Amsterdam, v. 314, n. 1-2, p. 198-204, 2014.

- [19] Ferrer, B. P. Avaliação em laboratório do efeito da formulação e das propriedades de graxas lubrificantes no desempenho tribológico do contato roda-trilho. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.
- [20] Hutchings, I.; Shipway, P. **Tribology**: friction and wear of engineering materials. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [21] Stock, R.; Schwarzenberger, R.; Kubin, W. Rail milling as an integrated strategy for modern rail asset management. In: CORE 2018: Rail: Smart, Automated, Sustainable, Conference on Railway Excellence, 30 April-2 May 2018, Sydney, NSW, Australia. [s.n.], 2018.
- [22] Steyn, E. **Rail surface treatment–grinding and milling–competing or complementary technologies**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Chalmers University Of Technology, Gothenburg, 2019.
- [23] Rodrigues, S. C. A. **Modelo de regressão linear e suas aplicações**. 2012. Relatório de Estágio – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2012.
- [24] Santos, C. M. A. **Estatística Descritiva** – Manual de auto-aprendizagem. Lisboa: Edições Sílabo, 2007.
- [25] Curral, J. **Statistics Packages**: A General Overview. Glasgow: Universidade de Glasgow, 1994.
- [26] Barbeta, P. A. **Estatística aplicada às Ciências Sociais**. 5. ed. Florianópolis: UFSC, 2003.
- [27] Yamauti, M. M. **Regressão linear simples nos livros de estatística para cursos de Administração**: um estudo didático. 2013. Dissertação (Mestrado em Educação Matemática) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [28] Moreira, M. S. *et al.* **Regressão linear simples e múltipla**. Bioestatística quantitativa aplicada. Porto Alegre: UFRGS, 2020.