



ANÁLISE DA TAXA DE DESGASTE DAS RODAS DE ESMERILHADORAS DE TRILHOS

Amanda Conrad¹; Leonardo S. Soares¹; Maura M. P. Conceição¹

¹Loram South America — Brasil

RESUMO

As rodas são componentes essenciais no sistema de transporte ferroviário e são consideradas críticas devido ao seu alto custo e à sua relação com a segurança operacional. A condição das rodas impacta a estabilidade do veículo e pode inclusive levar a descarrilamentos. Um dos fatores relevantes na interação roda-trilho é a condição da superfície de contato, o que leva os operadores a implementarem programas de reperfilamento de rodas, gestão de atrito e esmerilhamento de trilhos. Em esmerilhadoras de trilhos, a manutenção adequada das rodas é igualmente importante para garantir a eficiência e a segurança das operações. Embora o esmerilhamento contribua para a redução de defeitos e para a melhoria do contato roda-trilho, esse processo altera significativamente as condições superficiais do trilho, especialmente nas primeiras passagens após a intervenção. Essas alterações podem influenciar o desgaste das rodas do próprio equipamento, particularmente nos vagões posicionados após os rebolos de esmerilhamento. Desta forma, este estudo tem como objetivo analisar o comportamento do desgaste das rodas de esmerilhadoras de trilhos em função do posicionamento dos vagões na composição e das condições do trilho após o esmerilhamento. Os resultados obtidos indicam que vagões posicionados após os rebolos apresentam maiores taxas de desgaste quando comparados aos posicionados na parte inicial da composição, sugerindo a influência das condições do trilho imediatamente após o esmerilhamento no comportamento do desgaste.

Palavras-chave: *Desgaste de rodas; Interação roda-trilho; Esmerilhamento de trilhos.*

1. INTRODUÇÃO

O desgaste de rodas ferroviárias é um dos principais fatores que afetam a confiabilidade, a segurança e os custos operacionais do transporte ferroviário. O perfil da roda influencia diretamente a estabilidade dinâmica, o conforto e a segurança contra descarrilamentos. A interação roda-trilho, associada às forças normais e tangenciais e às características da via, provoca alterações progressivas no perfil da roda, exigindo estratégias de manutenção baseadas na previsão de desgaste (Lewis & Olofsson, 2009; Jendel, 2002).

Esse processo de desgaste ocorre principalmente em duas regiões do perfil transversal da roda: a bandagem (*tread*) e o friso da roda (*flange*). A remoção contínua de material nessas regiões altera a conicidade equivalente, comprometendo a estabilidade do veículo, especialmente em curvas, podendo levar a instabilidades laterais e à necessidade de reperfilamento (Lewis & Olofsson, 2009).

A relevância deste fenômeno é evidenciada por estudos conduzidos na América do Norte, os quais indicam que danos na superfície de rolamento, especialmente defeitos de alto impacto, constituem a principal causa de retirada de rodas de serviço, representando aproximadamente 67% de todas as substituições de rodéis. O desgaste, por sua vez, contribui com cerca de 27% dessas remoções, principalmente devido a frisos altos (66%) e frisos finos (25%) (Ghidini, A., Diener, M. & Schneider, J., 2010). Esses

resultados reforçam a importância do monitoramento de parâmetros geométricos da roda para manutenção preditiva e prevenção de falhas.

Entre os fatores que influenciam esse processo, o esmerilhamento de trilhos destaca-se como uma prática essencial para restaurar o perfil do trilho e controlar defeitos relacionados à fadiga. Entretanto, estudos indicam que o esmerilhamento provoca um aumento imediato da rugosidade superficial, o que pode acelerar o desgaste das rodas nas primeiras passagens após a intervenção (Magel & Kalousek, 2002).

Embora o desgaste de rodas em trens de carga e passageiros tenha sido amplamente estudado, análises focadas em veículos de manutenção de via, como esmerilhadoras de trilhos, ainda são escassas na literatura. Devido às suas condições operacionais específicas, como a elevada rugosidade do trilho imediatamente após o esmerilhamento e características operacionais distintas, essas máquinas estão sujeitas a padrões de desgaste diferenciados. Assim, este estudo tem como objetivo analisar o comportamento de desgaste das rodas de duas esmerilhadoras de trilhos operando sob condições distintas, a fim de subsidiar o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de manutenção preditiva e gestão do ciclo de vida desses componentes.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Caracterização das esmerilhadoras

As esmerilhadoras analisadas são compostas por diferentes tipos de vagões com funções específicas, incluindo vagões de tração (FCC e RCC), controle (PC), vagões de água (WC1 e WC2) e unidades equipadas com rebolos de esmerilhamento (GC1 a GC4).

A Figura 1 apresenta o arranjo dos vagões de uma das esmerilhadoras de trilhos analisadas. Os vagões FCC e RCC foram excluídos das análises por possuírem truques diferentes dos demais, o que afeta a comparabilidade dos resultados. Além disso, os rebolos de esmerilhamento estão localizados do vagão GC1 ao GC4. Além disso, as máquinas estudadas operam em apenas um sentido e são guiadas pelo vagão FCC.

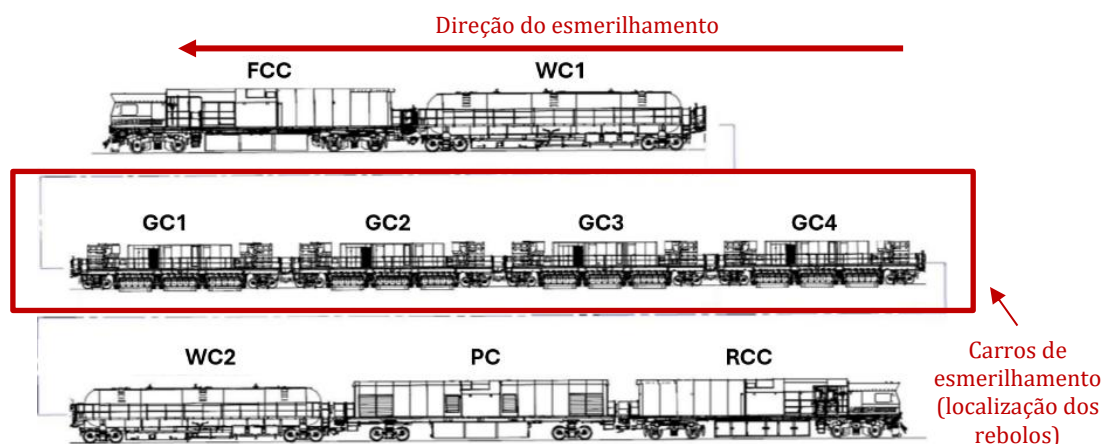


Figura 1. Esquemático dos vagões da primeira esmerilhadora analisada.

2.2. Procedimento de medição

As medições dos perfis das rodas foram realizadas utilizando um perfilômetro a laser sem contato da série MPRC, capaz de adquirir o perfil completo da roda diretamente no material rodante, sem necessidade de desmontagem. O equipamento realiza o escaneamento da superfície da roda através de um sensor a laser, permitindo a determinação automática dos parâmetros geométricos de interesse.

Entre os principais parâmetros medidos estão a altura do friso, espessura do friso e dimensões associadas à bandagem, obtidos a partir do processamento do perfil digitalizado.

O equipamento apresenta resolução de 0,01 mm e precisão de medição da ordem de $\pm 0,03$ mm para os principais parâmetros geométricos, garantindo elevada confiabilidade nos dados adquiridos.

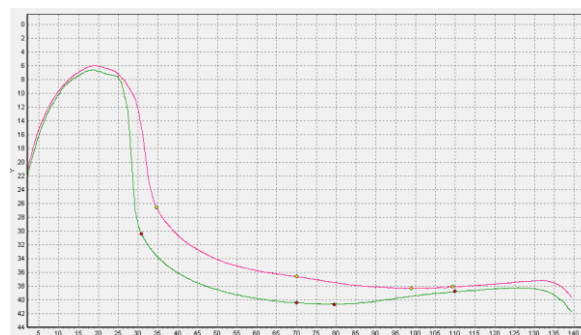
Foram realizadas quatro campanhas de medição ao longo da operação das esmerilhadoras. A taxa de desgaste foi determinada a partir da variação dimensional entre medições consecutivas e da distância percorrida no período, sendo expressa em termos equivalentes a milímetros por mil quilômetros (mm/1000 km).

Os valores foram apresentados de forma normalizada, com o objetivo de preservar a confidencialidade dos dados operacionais, sem prejuízo da análise comparativa entre os vagões.

A Figura 2 ilustra o processo de medição do perfil das rodas, incluindo o posicionamento do equipamento, a interface de aquisição e o perfil digitalizado utilizado na análise.



b)



c)

Figura 2. Processo de medição do perfil de rodas: (a) posicionamento do perfilômetro na roda; (b) interface de aquisição e análise; (c) perfil digitalizado utilizado para determinação dos parâmetros geométricos.

2.3. Parâmetros analisados

Os parâmetros geométricos analisados foram: altura do friso, espessura do friso e largura da bandagem, os quais são amplamente utilizados para avaliação do desgaste em rodas ferroviárias (Figura 3).

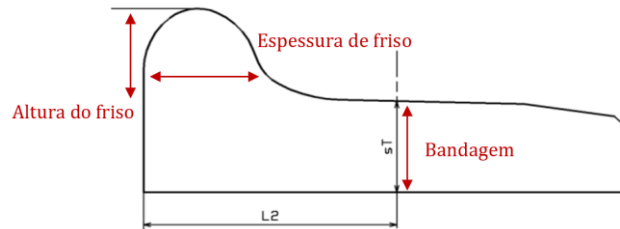


Figura 3. Definição dos parâmetros geométricos analisados no perfil da roda: altura do friso, espessura do friso e largura da bandagem.

2.4. Aquisição e tratamento dos dados

Para esta análise, as taxas médias de desgaste foram calculadas para cada roda, considerando os lados esquerdo e direito de cada truque, e posteriormente agregadas por vagão. Essa abordagem permitiu uma representação consolidada da severidade média do desgaste ao longo da composição. Adicionalmente, em uma fase do estudo, os pesos estimados dos vagões foram utilizados em termos relativos, com o objetivo de investigar possíveis correlações entre a carga e a severidade do desgaste das rodas.

A análise teve como objetivo avaliar a influência da condição do trilho antes e após o esmerilhamento no desgaste das rodas, por meio da comparação do comportamento dos vagões posicionados antes e depois dos rebolos de esmerilhamento. Todas as análises desenvolvidas ao longo deste estudo foram baseadas em dados de duas esmerilhadoras de trilhos operando em diferentes ferrovias. Ambas possuem configurações de vagões semelhantes, com a diferença de que apenas uma delas inclui o vagão GC4 em sua composição.

Os dados obtidos possibilitam análise comparativa entre os vagões, não sendo possível isolar individualmente todas as variáveis que influenciam o desgaste, como condições da via, geometria do trilho e estado superficial após o esmerilhamento.

Com base nessa metodologia, foi possível avaliar comparativamente o comportamento do desgaste ao longo dos vagões das esmerilhadoras, conforme apresentado na seção seguinte.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute os principais resultados obtidos a partir da análise das taxas de desgaste das rodas das esmerilhadoras analisadas.

3.1. Taxa média de desgaste

A Figura 4 mostra a distribuição das taxas médias de desgaste relativas para os parâmetros de altura do friso, espessura do friso e bandagem ao longo dos vagões da primeira esmerilhadora analisada. Neste primeiro caso, observa-se um aumento progressivo nos níveis de desgaste a partir do vagão GC2, com um pico acentuado no GC4, particularmente nos parâmetros de altura do friso e bandagem. Esse comportamento sugere que os vagões intermediários, que circulam sobre trilhos recém-esmerilhados e



ainda não condicionados pela passagem de outros vagões, estando sujeitos a condições de contato potencialmente mais severas, são os mais afetados pelas condições de contato do trilho imediatamente após o esmerilhamento.

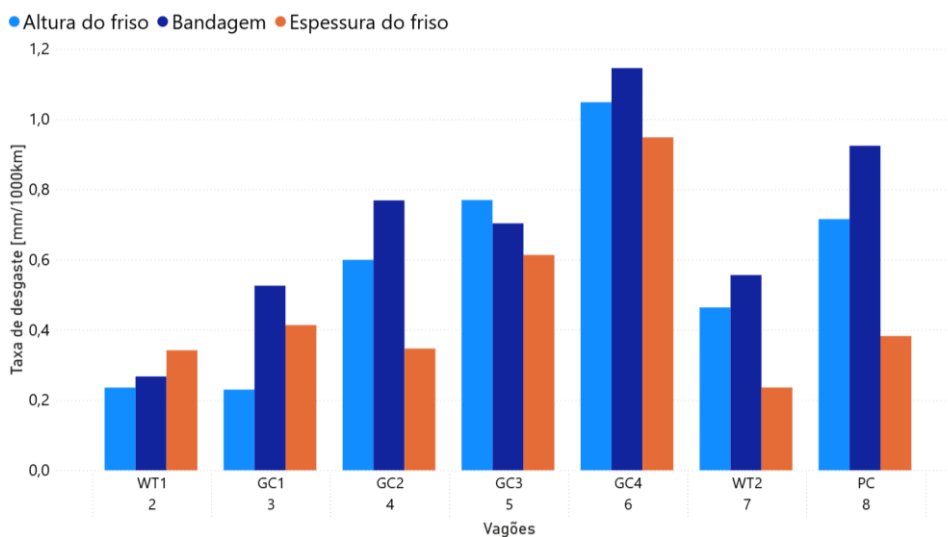


Figura 4. Taxa média de desgaste da primeira máquina analisada.

A Figura 5 apresenta a mesma análise aplicada à segunda esmerilhadora. Embora os valores absolutos de desgaste sejam, em geral, inferiores aos observados na primeira máquina, verifica-se novamente que os vagões posicionados após os rebolos de esmerilhamento, especialmente o WT2, apresentam as maiores taxas em todos os parâmetros monitorados. A similaridade entre os comportamentos das duas análises sugere influência de que a sequência dos vagões, associada às condições do trilho imediatamente após o esmerilhamento, antes de qualquer condicionamento pela passagem de outros veículos, desempenha papel determinante no comportamento do desgaste das rodas.

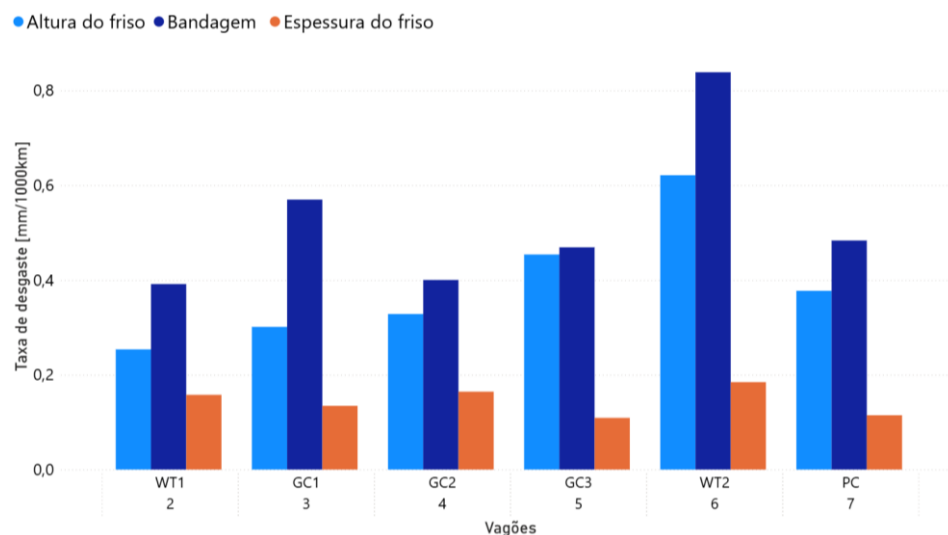


Figura 5. Taxa média de desgaste da segunda máquina analisada.

As diferenças absolutas entre as taxas de desgaste das duas máquinas podem estar associadas a fatores como a condição do trilho deixada pelo esmerilhamento e às particularidades operacionais e geométricas das ferrovias em que cada máquina opera. Como as duas composições atuam em diferentes ferrovias, é esperado que a interação



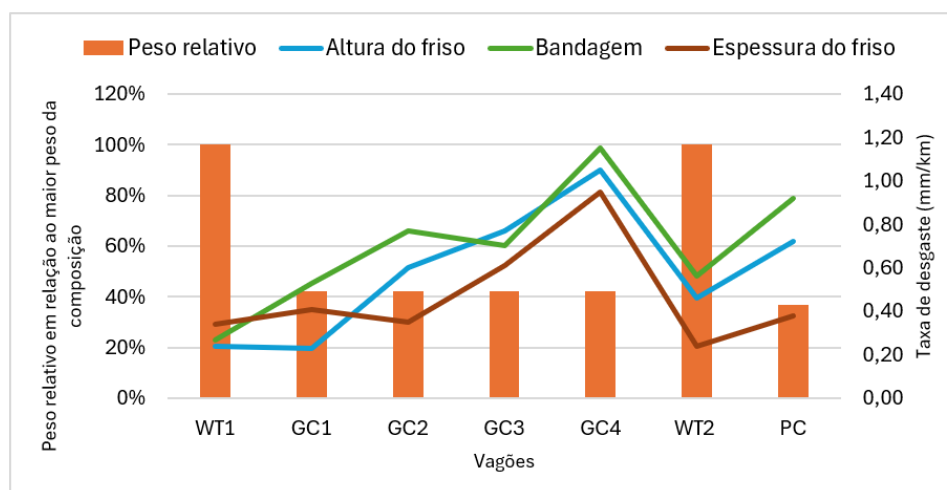
roda-trilho e o perfil de desgaste sejam influenciados pelas condições específicas de cada ferrovia.

Além disso, os gráficos mostram que, em ambas as composições, a bandagem apresenta os maiores valores médios de desgaste, o que é esperado, uma vez que a bandagem constitui a principal região de contato roda-trilho, sendo naturalmente a mais solicitada ao longo da operação. Esse comportamento sugere uma correlação mais direta entre desgaste da bandagem e distância total percorrida, tornando-a um possível parâmetro prioritário para monitoramento. Por outro lado, a espessura do friso apresenta menos variações ao longo da composição, o que pode estar associado à sua menor sensibilidade à rugosidade do trilho. Esse comportamento é coerente, uma vez que esse parâmetro tende a ser menos influenciado pela condição superficial deixada pelo esmerilhamento e mais relacionado à geometria da via, especialmente à presença de curvas.

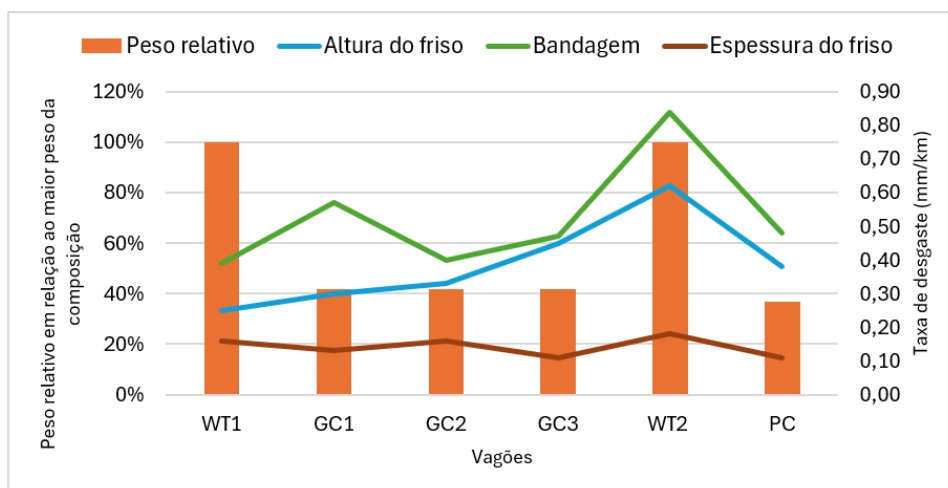
Esses resultados reforçam o potencial da bandagem como indicador em estratégias de manutenção preditiva, ao mesmo tempo em que evidenciam a importância de considerar a sequência dos vagões na avaliação da severidade do desgaste.

3.2. Influência da massa do vagão no desgaste das rodas

Além dos valores médios de taxa de desgaste por vagão, foi realizada uma análise com base nas massas de cada vagão. As Figuras 6a e 6b mostram os valores médios de desgaste e as massas relativas dos vagões das duas máquinas analisadas. Embora existam variações entre os vagões de cada composição, não foi possível identificar uma correlação clara entre maior peso e maiores taxas de desgaste nos dados analisados. Esse resultado é relevante, uma vez que o objetivo da análise é investigar como o posicionamento dos vagões em relação ao esmerilhamento e, conseqüentemente, à rugosidade da via, influencia o desgaste. Desta forma, mesmo vagões mais pesados podem apresentar menores taxas de desgaste nas condições observadas, possivelmente devido à influência do posicionamento na composição e das condições do trilho.



a)



b)

Figura 6. Massa relativa e taxas médias de desgaste das rodas por vagão para a) a primeira máquina analisada e b) a segunda máquina analisada.

A comparação entre os vagões WT1 e WT2 evidencia ainda mais o impacto potencial do posicionamento no desgaste das rodas. Nesses casos, apesar de possuírem a mesma configuração e peso, os vagões ocupam posições distintas na esmerilhadora, onde o WT1 circula antes dos rebolos, enquanto o WT2 trafega imediatamente após. Em ambas as máquinas, o WT2 apresentou as maiores taxas médias de desgaste em altura do friso e bandagem. Essa variação sugere que vagões que operam sobre trilhos recém-esmerilhados, caracterizados por maior rugosidade superficial, estão sujeitos a condições operacionais mais severas, o que pode contribuir para um desgaste intensificado, mesmo quando outras variáveis, como massa e projeto, são idênticas.

Além disso, os dados mostram que vagões mais leves, como o GC4, podem apresentar as maiores taxas de desgaste, enquanto o mais pesado, WT1, não está entre os mais críticos. Esse contraste indica que a posição do vagão na composição de esmerilhamento e a rugosidade do trilho no ponto de contato são fatores mais decisivos do que o peso em si, devendo, portanto, ser priorizados em diagnósticos técnicos e estratégias de manutenção.

De modo geral, os resultados indicam que as condições do trilho após o esmerilhamento e o posicionamento dos vagões podem influenciar significativamente o desgaste observado, não sendo possível, neste estudo, comparar diretamente sua contribuição em relação à massa. A consistência desse padrão em ambas as máquinas indica a necessidade de ajustar os planos de manutenção considerando o posicionamento relativo dos vagões no processo de esmerilhamento. Embora a massa influencie as forças de contato roda-trilho, a análise confirma que vagões mais pesados não necessariamente apresentam maior desgaste. Assim, o posicionamento das rodas permanece como fator predominante, e os intervalos de inspeção devem priorizar vagões que operam sobre trechos recém-esmerilhados e mais rugosos, em vez de focar exclusivamente nos vagões mais pesados.

Embora os resultados sugiram a influência das condições do trilho imediatamente após o esmerilhamento, não foram realizadas medições diretas de rugosidade, sendo essa interpretação baseada no comportamento observado ao longo da composição.



Recomenda-se a inclusão dessa variável em estudos futuros para melhor quantificação do fenômeno.

4. CONCLUSÃO

Este estudo analisou o desgaste das rodas de duas esmerilhadoras de trilhos, com base em medições periódicas dos parâmetros geométricos altura do friso, espessura do friso e bandagem. Por meio do cálculo das taxas de desgaste e da análise de sua relação com o posicionamento dos vagões na máquina, a condição da via e a massa dos vagões, foi possível estabelecer conclusões relevantes para a gestão da manutenção dessas composições especiais.

Os resultados mostraram que a posição dos vagões em relação aos rebolos de esmerilhamento exerce influência direta na severidade do desgaste. Vagões localizados após os rebolos apresentaram taxas médias de desgaste significativamente mais elevadas, sugerindo que o contato com trilhos recentemente esmerilhados, caracterizados por condições superficiais recentemente modificadas pelo esmerilhamento, contribui para condições operacionais mais severas para as rodas.

Adicionalmente, observou-se que a bandagem é o parâmetro mais sensível ao desgaste, o que é esperado, uma vez que a bandagem constitui a principal região de contato roda-trilho. Por outro lado, a espessura do friso apresentou menor variação, o que pode indicar menor influência da rugosidade da via ou a atuação de outros fatores não avaliados neste estudo, como a geometria da via, sistemas de lubrificação da face ativa do trilho ou características metalúrgicas das rodas.

A análise das massas estimadas dos vagões não revelou correlação direta entre maior massa e aumento do desgaste. Em alguns casos, vagões mais leves, apresentaram taxas de desgaste mais elevadas, enquanto vagões mais pesados, demonstraram comportamento oposto. Essa análise sugere que a interação roda-trilho e o perfil de rugosidade do trilho são determinantes mais relevantes do que a massa do vagão no plano de manutenção.

Desta forma, este estudo contribui para a formulação de estratégias de manutenção mais eficazes ao evidenciar a importância de considerar a condição do trilho após o esmerilhamento e o desgaste específico associado ao posicionamento dos vagões nas esmerilhadoras, e não se basear exclusivamente em critérios de carga transportada. Medidas como a inversão do sentido de esmerilhamento e a adoção de rodas de maior dureza nos vagões mais suscetíveis ao desgaste podem constituir alternativas viáveis para mitigar os efeitos identificados.

Recomenda-se que investigações futuras explorem com maior profundidade os níveis de rugosidade do trilho antes e após o esmerilhamento, bem como sua relação direta com o desgaste das rodas. Estudos adicionais também devem examinar os fatores que influenciam a degradação das rodas, incluindo a geometria da via, a presença de sistemas de lubrificação da face ativa do trilho e as características metalúrgicas das rodas.

5. REFERÊNCIAS

GHIDINI, A.; DIENER, M.; SCHNEIDER, J. *Wheels for freight cars: development and applications for heavy haul service*. Lovere: Lucchini RS, 2010. (Lucchini RS Series LRS-Techno, v. 3).



JENDEL, T. Prediction of wheel profile wear—comparisons with field measurements. *Wear*, v. 253, n. 1–2, p. 89–99, 2002.

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. *Wheel–rail interface handbook*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.

MAGEL, E.; KALOUSEK, J. The effect of rail grinding on wheel wear. *Wear*, v. 253, n. 1–2, p. 308–316, 2002.



ANALYSIS OF WHEEL WEAR RATE IN RAIL GRINDERS

ABSTRACT

Wheels are essential components in railway transportation systems and are considered critical due to their high cost and direct relationship with operational safety. The condition of the wheels affects vehicle stability and may even lead to derailments. One of the relevant factors in the wheel–rail interaction is the condition of the contact surface, which leads operators to implement wheel reprofiling programs, friction management, and rail grinding practices. In rail grinding machines, proper wheel maintenance is equally important to ensure operational efficiency and safety. Although grinding contributes to defect removal and improves the wheel–rail contact condition, this process significantly alters the surface condition of the rail, especially during the first passes after the intervention. These changes may influence the wear of the wheels of the grinding machine itself, particularly in wagons positioned after the grinding stones. Thus, this study aims to analyze the wear behavior of wheels in rail grinding machines as a function of wagon position within the consist and the condition of the rail after grinding. The results indicate that wagons positioned after the grinding stones present higher wear rates compared to those located at the front of the consist, suggesting the influence of the rail condition immediately after grinding on the wear behavior.

Keywords: *Wheel wear; Wheel–rail interaction; Rail grinding.*