



DETECÇÃO DE DANOS EM TRILHOS FERROVIÁRIOS POR PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Wilker Luz Rodrigues¹; Douglas Domingues Bueno¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista (UNESP) — Brasil

RESUMO

A inspeção e detecção de defeitos em trilhos no Brasil ainda é realizada visualmente por um operador ou uma equipe treinada, o que é um processo custoso e lento. Nesse contexto, este trabalho propõe um método de automatização baseado em processamento de imagens e normas matriciais para detectar defeitos, visando maior eficiência e confiabilidade. Para isso, foi utilizado um veículo robótico com câmera embarcada (com resolução de 478x850 pixels a 30 fps) para registrar a alma ao longo de um metro de trilho, onde havia um pequeno pedaço de post-it rasgado e uma mancha. Os processos seguintes se constituíram na separação do vídeo em quadros em escalas de cinza, no realçamento de diferenças em relação a uma imagem de referência (obtida a partir da média de seis imagens com condições conhecidas sem danos), aplicação das normas de Frobenius, Espectral e Nuclear em cada imagem de diferença, e por fim, análise dos resultados considerando três diferentes velocidades do veículo, 38.0, 25.5 e 17.3 cm/s. Os resultados demonstraram que as normas de matrizes são capazes de detectar defeitos em trilhos, pois seus valores foram altos quando as imagens continham o post-it e a mancha. Também foi observado que as normas apresentaram flutuações de acordo com a variação de iluminação do ambiente, demonstrando sensibilidade à luz externa. Conclui-se, portanto, que as normas de matrizes constituem potenciais ferramentas para eficiente inspeção de malhas ferroviárias e estudos seguintes buscarão aprimorar os métodos e análises utilizados, especialmente no pré-processamento das imagens, buscando potencializar a detecção.

Palavras-chave: *Inspeção ferroviária, Processamento de imagens, Normas matriciais.*

1. INTRODUÇÃO

Entre os diferentes métodos utilizados para a detecção de defeitos em trilhos de trem, a inspeção visual, realizada por um operador ou uma equipe treinada, ainda é o mais empregado no Brasil e em outros diversos países. No entanto, esta estratégia envolve uma operação muito dispendiosa, lenta e propensa a erros. Kumar e Harsha (2025) apresentam um levantamento da evolução e dos principais desenvolvimentos até o momento atual envolvendo a tendência das inspeções visuais, e notam que a automatização da análise através de técnicas de processamento de imagens, apresenta-se com um relevante potencial devido a ser mais eficiente e rápido do que a inspeção visual, principalmente quando executada com algoritmos de inteligência artificial (IA).

Aplicações envolvendo análise de imagens tem se tornado cada vez mais viáveis, especialmente pela crescente disponibilidade de conjunto de imagens disponíveis na literatura. Estes *datasets* são robustos, com imagens reais, as vezes obtidas especificamente para finalidade de treinar algoritmos computacionais, como por exemplo aquele publicado por Arain et al (2024). No entanto, no Brasil ainda são limitadas as aplicações relacionadas à detecção de danos em trilhos de trem baseadas em imagens.

Franca e Vassallo (2021), por exemplo, desenvolveram um algoritmo baseado em processamento de imagens clássico, que obteve resultados acima de 97% de detecção de defeitos em dormentes. Também, o artigo de Barroso e Queiroz (2024), que apresenta dois algoritmos com base em rede neural convolucional (CNN) para comparar o efeito do exterior do trilho em falsos positivos.

Com base nesse panorama, tem-se que a detecção de danos baseada em imagens é uma importante alternativa ao se comparar com a clássica operação de monitoramento de trilhos de trem, que envolve avaliação visual. Note que atualmente é significativamente fácil gravar vídeos, especialmente usando celulares ou pequenas câmeras filmadora e, por isso, extrair fotografias (*frames*) dos vídeos também é uma opção significativamente conveniente. Por outro lado, considerando que uma típica malha ferroviária tem milhares de quilômetros de extensão, as análises das imagens devem ser realizadas computacionalmente, ao menos para uma pré-seleção de imagens com possíveis registros de danos. Neste contexto, o presente trabalho compreende um estudo sobre técnicas de análise de imagens com foco na detecção de danos em trilhos a partir de sequências de frames e, sobretudo, propõe a aplicação inédita de normas de matriz diretamente como índice de detecção de dano nesse tipo de problema.

2. DESENVOLVIMENTO

Para a coleta da sequência de frames utilizou-se um veículo robótico equipado com câmera embarcada para registrar a alma de um trilho de um metro ao longo de todo o percurso (Figura 1). Embora a presente aplicação considere o dano na alma do perfil do trilho, a metodologia proposta se aplica para o dano em qualquer região da estrutura, especialmente ao se considerar que emprega-se uma região da imagem, ou seja, ROI (do inglês *Region of Interest*).

O sistema operou em três diferentes velocidades: 38.0, 25.5 e 17.3 cm/s, com resolução de 478x850 pixels e taxa de quadros de 30 fps. O experimento tinha como objetivo detectar um pequeno pedaço de post-it rasgado e uma mancha presentes no trilho.



Figura 1. Trilho e veículo utilizados.



2.1. Escalas de Cinza e Realçamento de Danos

Nessa presente análise, foram utilizadas somente as informações de intensidade da imagem, ignorando neste momento a complexidade da análise das cores, para isso, cada uma das imagens foi convertida do espaço de cores RGB para escalas de cinza utilizando a recomendação BT.601-7, da International Telecommunication Union (2011), apresentada na Equação (1), que se baseia na luminância perceptual do olho humano,

$$I_g = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

onde I_g representa a imagem em escala de cinza e R , G e B representam, respectivamente, os canais de cores vermelho, verde e azul.

Considera-se conhecida uma imagem cinza da alma do trilho que não apresente irregularidades, montada a partir da média de imagens saudáveis coletadas, essa imagem será I_b (no qual o subscrito " b " vem de *baseline*), com mesmas dimensões que os quadros capturados pelo veículo. A esta imagem são comparados cada um dos quadros capturados, de forma a realçar as anormalidades nas imagens com condição desconhecida, ou, de outra forma,

$$I_{en} = |I_g - I_b| \quad (2)$$

onde I_{en} se trata da imagem cinza realçada (o subscrito " en " vem de *enhanced*). Observe que, desta forma, o valor dos pixels iguais entre a imagem desconhecida e a imagem base se tornam zero na matriz da imagem realçada e apenas o defeito aparece, portanto, esta propriedade pode explorada para a detecção de anormalidade.

2.2. Normas de Matriz

Como índices de detecção de danos foram utilizadas normas de matriz, pois seus axiomas, descritos em Horn e Johnson (2013), atribuem propriedades interessantes a essa aplicação, entre elas estão:

$$\|M\| \geq 0 \quad (3)$$

$$\|M\| = 0 \leftrightarrow M = 0 \quad (4)$$

onde $\|M\|$ representa a norma da matriz M .

Foram avaliadas três diferentes normas: Frobenius, Espectral e Nuclear, descritas respectivamente como:

$$\|M\|_F = \left(\sum_i \sum_j |m_{ij}|^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$\|M\|_2 = \max |\sigma_i| \quad (6)$$



$$\|M\|_* = \sum_i \sigma_i \quad (7)$$

onde m_{ij} representa o elemento i, j -ésimo da matriz M , e σ_i o i -ésimo valor singular da mesma matriz, obtido através de decomposição em valores singulares (SVD). A escolha dessas normas se deve a suas consolidações em outras áreas de pesquisa e fácil implementação em Python. Em suma, a norma de Frobenius funciona como uma medida da energia do dano realçado, a norma Espectral foca na magnitude máxima da irregularidade, e a norma nuclear detecta a complexidade do dano.

Essas normas foram, então, aplicadas a sequência de quadros realçados. No entanto, como seus resultados brutos são poucos significativos, realizou-se a normalização:

$$\|I_{en}\|^* = \frac{\|I_{en}\|}{\|I_b\|} \quad (8)$$

para qualquer norma calculada, de forma que o índice passou a ser um valor relativo à norma da imagem conhecida sem dano.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam os resultados obtidos para os experimentos com, respectivamente, as normas de Frobenius, Espectral e Nuclear, onde cada barra representa o valor da norma adimensional obtido para um quadro.

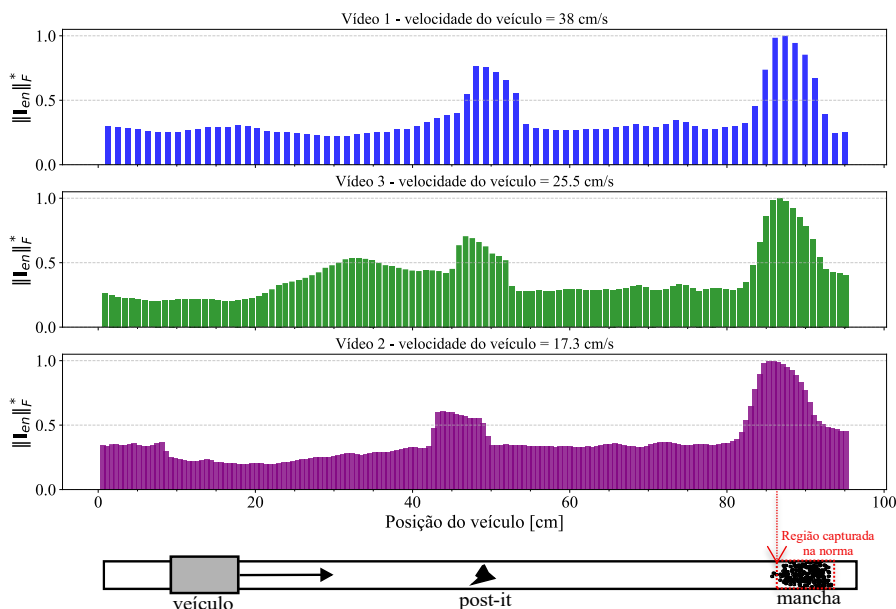


Figura 2. Normas de Frobenius normalizadas das imagens realçadas.

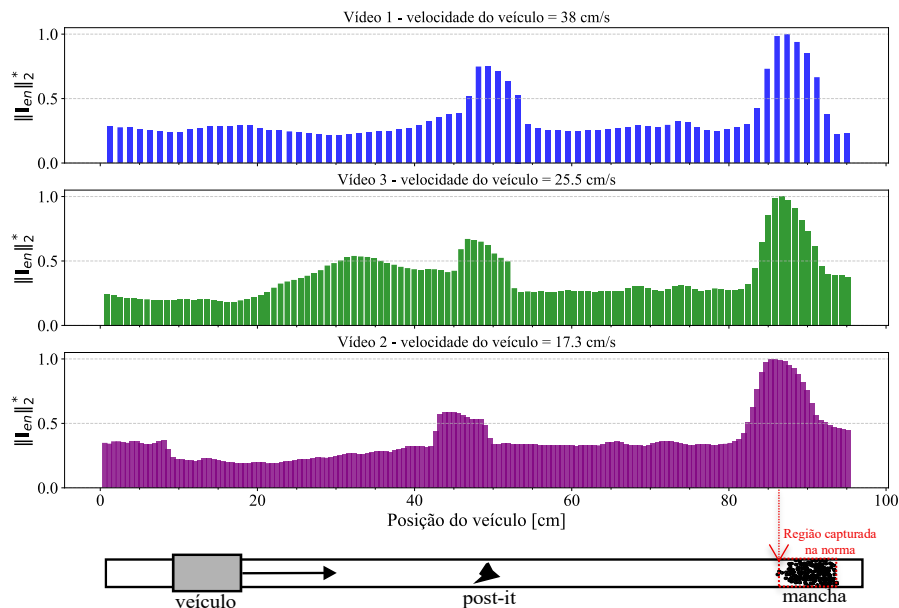


Figura 3. Normas Espectrais normalizadas das imagens realçadas.

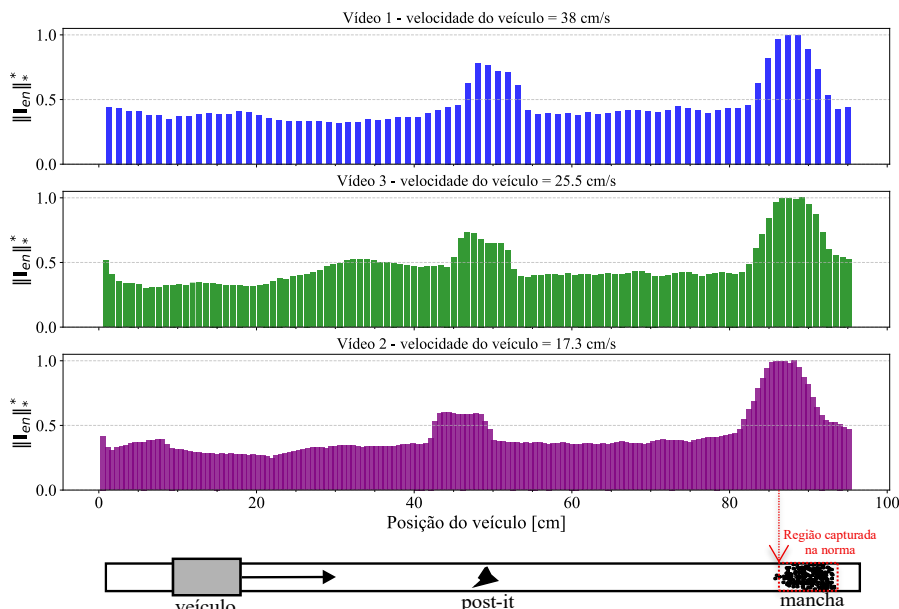


Figura 4. Normas Nucleares normalizadas das imagens realçadas.

Os gráficos obtidos indicam as seguintes características para a detecção de danos utilizando normas de matriz:

- As normas são sensíveis aos danos;
- Os defeitos são acusados através de três diferentes regiões: Sua entrada na filmagem (crescimento da norma), sua permanência (norma constante) e a saída do defeito (decréscimo da norma). No entanto, se o dano for grande o suficiente para não caber na região de captura da câmera, ou se a velocidade do veículo for grande o suficiente para o dano aparecer poucas vezes inteiro dentro da região de captura, os comportamentos se reduzem apenas a entrada e saída do dano. A presença dessa região indica que possivelmente a combinação das normas com



suas derivadas discretas (baseado nas imagens anterior e posterior) sejam um robusto método de detecção.

- Quanto menor a velocidade do veículo, ou por outro lado, maior o número de quadros por comprimento captados, em mais frames é acusada a presença de irregularidade no trilho;
- As normas apresentaram sensibilidade a variação de iluminação, como aparente nos gráficos em verde (25.5 cm/s) entre 20 e 40 cm. Para evitar que essa variação cause falsos positivos é necessário que as imagens sejam pré-processadas, ou as normas de matriz combinadas com informações de cores das imagens.
- Para o dado experimento, as normas apresentaram comportamentos semelhantes, com exceções de que: i) a norma nuclear apresentou um platô nas duas menores velocidades para a mancha, e ii) a norma nuclear apresentou um maior valor relativo nas regiões sem dano quando comparado as outras duas. No entanto, para melhor avaliação das diferenças entre as normas será necessária sua aplicação a diferentes tipos de danos, com diferentes características de geometria e textura.

Outros estudos, de mesma autoria, vêm sendo realizados a fim de consolidar a utilização das normas como índice de detecção de dano, sobretudo, na parametrização das normas, onde foi constatado que o comprimento da região de entrada (ou saída) são iguais ao comprimento do dano na direção da velocidade do veículo, e a soma da entrada mais permanência é igual ao comprimento da região de filmagem, para o caso de danos menores que a região de filmagem (em caso contrário os resultados se invertem). O esquema da Figura 5 ilustra essas situações.

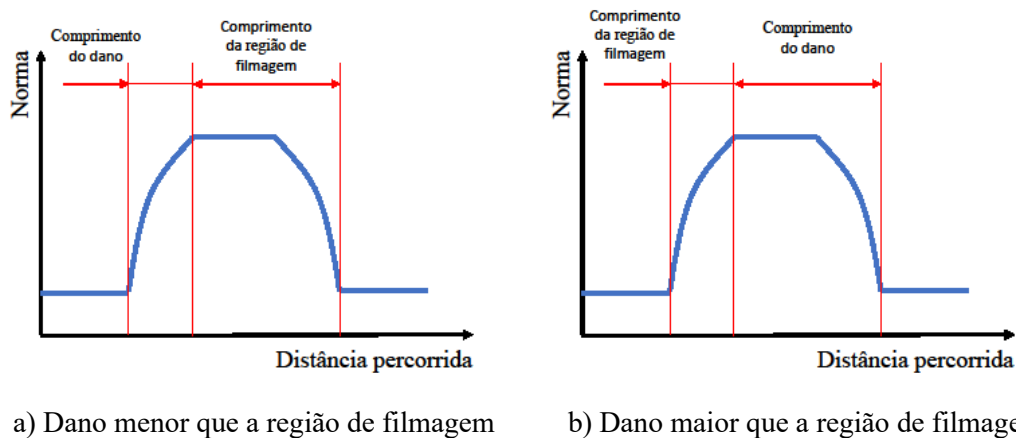


Figura 5. Relação dos comprimentos de entrada, saída e permanência com o comprimento do dano e da região de filmagem.

Referente ao comportamento dos perfis observados, constatou-se que a intensidade da norma em um quadro é diretamente proporcional a raiz quadrada da área do dano dentro desse quadro, e portanto, o comportamento observado depende de como a área está variando ao longo da sequência de quadros.

Outro ponto a se destacar é a simplicidade de cálculo das normas de matriz frente a outras técnicas, tais como a aplicação de CNN para a análise e detecção de danos. O que, no entanto, não impede a utilização dessas mesmas normas, em conjunto com outras propriedades de imagens já consolidadas (como cor, textura, bordas), para um treinamento de classificadores CNN ainda mais eficientes.



Por fim, vale citar que os experimentos realizados se limitaram aos equipamentos disponíveis: um veículo de baixas velocidades e uma câmera com baixa resolução e taxa de quadros. No entanto, com a utilização de câmeras modernas, equipadas em veículos ferroviários de inspeção possibilitam a aplicação da técnica discutida sem grandes custos adicionais.

O gráfico da Figura 6 foi obtida considerando que todo o comprimento do trilho deve ser filmado, no entanto, sem sobreposição entre os frames (condição de velocidade máxima para não haver perda de danos). Para isso foi utilizado a expressão da velocidade média:

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \Delta S \times fps \quad (9)$$

onde o deslocamento ΔS é dado pelo comprimento do campo de visão e o tempo entre cada quadro é o inverso da taxa de quadros (fps). Desta forma, o limite da operação é dada pela velocidade máxima, e quanto mais abaixo a velocidade de operação estiver, em mais frames será acusada a presença de anomalia no trilho, conforme discutido anteriormente.

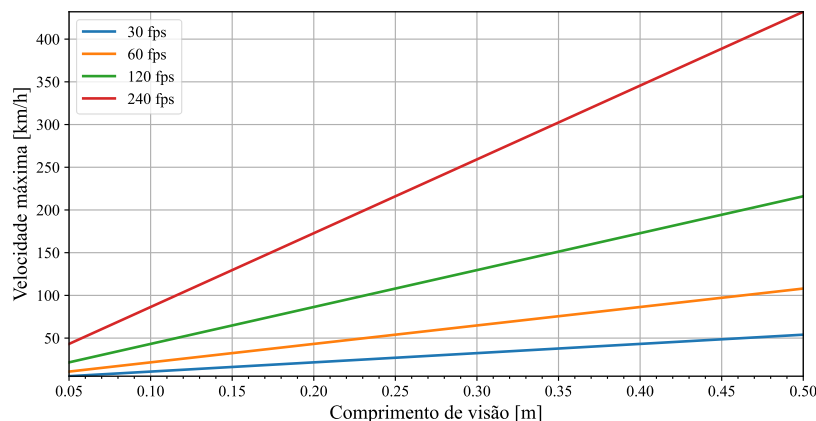


Figura 6. Relação entre o comprimento de visão, a taxa de quadros e a velocidade máxima possível para filmagem.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para as normas matriciais se mostraram capazes de detectar falhas em trilhos, e constituem potenciais ferramentas para a eficiente inspeção de malhas ferroviárias. Sobretudo, devido aos resultados obtidos comparados a complexidade dessas normas.

Estudos seguintes buscarão aprimorar os métodos e análises utilizados através da: i) realização e análise de experimentos teóricos, sem influências externas, buscando entender a influência do aspecto do dano nos padrões gerados pelas normas; ii) melhor especificação das propriedades de cada norma na detecção; iii) aplicação de técnicas de pré-processamento visando melhorar os resultados baseados em análise por norma de matriz; e iv) combinar as normas com outras técnicas já consolidadas para análise



imagens, tais como: análise de cor, textura, bordas e complexidade, de forma a evitar a ocorrência de falsos positivos na detecção e possível treinamento de um classificador para CNNs.

Em suma, este trabalho apresenta uma ferramenta promissora para a detecção de falhas em trilhos, e estabelece uma base conceitual e metodológica para o desenvolvimento de sistemas de inspeção mais autônomos e precisos. Após a integração com técnicas consolidadas de visão computacional, este estudo contribuirá para o avanço do estado da arte em monitoramento da integridade estrutural, e em última instância, possui o potencial de aumentar significativamente a segurança e a confiabilidade do transporte ferroviário.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo n.º 2025/17251-3, pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

Arain, A., Mehran, S., Shaikh, M. Z., Kumar, D., Chowdhry, B. S., & Hussain, T. (2024). Railway track surface faults dataset. *Data in Brief*, 52, 110050. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110050>

Barroso, M. S., & Queiroz, J. A. (2024). Detecção automática de defeitos em trilhos ferroviários através de visão computacional. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, 10(11), 7616–7629. <https://doi.org/10.51891/reaase.v10i11.17227>

Franca, A. S., & Vassallo, R. F. (2021). A Method of Classifying Railway Sleepers and Surface Defects in Real Environment. *IEEE Sensors Journal*, 21(10), 11301–11309. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3026173>

Horn, R. A., & Johnson, C. R. (2017). *Matrix analysis* (Second edition, corrected reprint). Cambridge University Press.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios*. Geneva, 2011. Recommendation ITU-R BT.601-7 (03/2011). Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.601>. Acesso em: 17 mar. 2026.

Kumar, A., & Harsha, S. P. (2025). A systematic literature review of defect detection in railways using machine vision-based inspection methods. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 18, 207–226. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2024.06.006>



DAMAGE DETECTION IN RAILWAY TRACKS USING IMAGE PROCESSING

ABSTRACT

Inspection and detection of defects in railway tracks in Brazil is still carried out visually by an operator or a trained team, which is a costly and slow process. In this context, this work proposes an automation method based on image processing and matrix norms to detect defects, aiming for greater efficiency and reliability. For this purpose, a robotic vehicle equipped with a camera with a resolution of 478×850 pixels at 30 fps was used to record the rail head along one meter of track, where there was a small section of post-it and a stain. The processes consisted of splitting the video into frames in grayscale, scaling the differences in relation to a reference image (obtained from the average of six images under known conditions without damage), applying the Frobenius, Spectral and Nuclear norm to each difference image, and finally analyzing the results considering three different vehicle speeds, 38.0, 25.5, and 17.3 cm/s. The results showed that matrix norms can detect defects in tracks, as their values were high when the images contained the post-it and the stain. It was also observed that the norms showed fluctuations according to variations in ambient lighting, demonstrating sensitivity to external light. It is concluded, therefore, that matrix norms constitute potential tools for efficient inspection of railway tracks, and future studies will seek to improve the methods and analyses used, especially in image preprocessing, aiming to enhance detection.

Keywords: *Railway inspection; Image processing; Matrix norms.*