



## AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA EM PAVIMENTO SOB DIFERENTES NÍVEIS DE SOLICITAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE IMERUTTING

João Pedro Lima de Moraes<sup>1</sup>; Matheus Assis Maia<sup>2</sup>; Gabriel de Carvalho Nascimento<sup>3</sup>;  
Antonio Carlos Rodrigues Guimarães<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Aluno de Graduação no Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro-RJ — Brasil

<sup>2</sup>Aluno de Graduação no Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro-RJ — Brasil

<sup>3</sup>Professor da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro-RJ — Brasil

<sup>4</sup>Professor do Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro-RJ — Brasil

### RESUMO

Este estudo avalia numericamente o afundamento de trilha de roda (ATR) em um pavimento submetido a diferentes níveis de solicitação, com base em dados experimentais a partir do uso de ensaios acelerados com o equipamento Heavy Vehicle Simulator (HVS), reportados por Mota (2025). As análises consideram um mesmo pavimento para distintos números de repetições de carga  $N$ , variando de 500 a 45.000. O estado de tensões induzido pela carga de roda é obtido no software IMERutting por meio do Método dos Elementos Finitos, adotando-se um modelo resiliente linearizado com módulo resiliente médio dos materiais. As tensões calculadas são comparadas às obtidas no AEMC, enquanto as previsões de deformação permanente são confrontadas com estimativas derivadas de dados de campo e com os resultados fornecidos pelo McDiNa. De forma complementar, avalia-se a influência da tensão residual de compactação a partir de simulações baseadas em parâmetros de referência da literatura e na formulação proposta por Ehrlich e Mitchell (1994). O estudo contribui para a análise da capacidade preditiva do IMERutting sob diferentes níveis de solicitação e para a investigação da sensibilidade das respostas mecânicas à consideração da tensão residual de compactação, de forma a tornar este software uma importante ferramenta para previsão de deformações permanentes e tensões admissíveis em pavimentos em geral.

**Palavras-chave:** *Afundamento de trilha de roda, Deformação permanente, Pavimentos, Método dos elementos finitos, IMERutting.*

### 1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário apresenta relevância estratégica para o Brasil, por sua capacidade de reduzir custos logísticos, ampliar a eficiência do transporte de cargas, oferecer maior segurança operacional e contribuir para uma matriz de transportes mais sustentável. Esse entendimento também aparece no planejamento federal recente, que trata a expansão e a modernização do sistema ferroviário como parte de uma estratégia de racionalização da matriz de transportes e de aumento da eficiência dos serviços logísticos no país (BRASIL, 2026).

Nesse sentido, o emprego de softwares de dimensionamento e análise estrutural assume papel central, uma vez que permite integrar propriedades dos materiais, condições de carregamento e critérios de desempenho em uma mesma base de análise, oferecendo suporte mais consistente à avaliação mecânica de tensões, deformações e vida de serviço das estruturas de transporte. Huang, Rose e Khoury (1986) destacaram a similaridade entre pavimentos rodoviários e leitos ferroviários e investigaram a extensão de conceitos de dimensionamento de pavimentos para o projeto de leitos com mistura



asfáltica, mostrando que essa adaptação é tecnicamente promissora, embora deva respeitar critérios estruturais específicos do sistema ferroviário.

Posteriormente, ferramentas numéricas como o KENTRACK passaram a ser utilizadas na análise estrutural de leitos ferroviários, combinando a teoria multicamadas de Burmister com o Método dos Elementos Finitos para calcular tensões e deformações, inclusive em estruturas com camadas asfálticas (Rose; Liu; Souleyrette, 2014).

Assim, é nesse contexto que se insere o IMERutting, desenvolvido para a análise da deformação permanente em pavimentos a partir do estado de tensões obtido numericamente. Embora, no presente trabalho, a validação da modelagem esteja relacionada a um pavimento rodoviário, sua formulação também apresenta potencial de aplicação em pavimentos ferroviários, especialmente na avaliação mecanística das camadas de apoio da via permanente sob carregamentos repetidos. Nesse sentido, Folly e Guimarães (2025) destacam a importância da determinação das tensões admissíveis em solos tropicais constituintes de subleitos ferroviários, obtendo maiores desempenhos que o método Heukelon e Klomp (1962). A partir dessa perspectiva, o IMERutting pode ser utilizado futuramente como ferramenta de apoio para estimar o estado de tensões no subleito ferroviário e, por meio de análises paramétricas, identificar níveis de solicitação compatíveis, contribuindo para a avaliação da tensão admissível do material de fundação. Dessa forma, propõe-se como hipótese central que, para uma mesma estrutura de pavimento, o IMERutting é capaz de representar adequadamente a progressão do afundamento em trilha de roda com o aumento do número de ciclos de carregamento, reproduzindo a tendência de acúmulo de deformação permanente e sua ordem de grandeza em relação aos dados de campo. No contexto ferroviário, essa abordagem pode ser estendida para a análise do subleito e das demais camadas de apoio, permitindo comparar as tensões calculadas numericamente com limites admissíveis, como discutido por Folly e Guimarães (2025). Assim, a contribuição futura do IMERutting não deve ser entendida como uma previsão direta de defeitos geométricos no trilho, mas como uma ferramenta para avaliar a resposta mecânica das camadas inferiores da via permanente e auxiliar estudos de dimensionamento, desempenho estrutural e manutenção ferroviária.

## **2. METODOLOGIA**

A metodologia adotada neste estudo baseia-se na análise de um trecho experimental reportado por Mota (2025), utilizado como referência para a definição da estrutura do pavimento, das propriedades dos materiais e das condições de carregamento. A partir desses dados, foram realizadas simulações numéricas no software IMERutting para diferentes números de repetições de carga ( $N$ ), com o objetivo de avaliar a evolução do afundamento de trilha de roda, considerando o modelo mecanístico-empírico de Guimarães (2009), utilizado no Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). As tensões obtidas foram comparadas com aquelas calculadas no software AEMC, enquanto as previsões de deformação permanente foram confrontadas com os resultados do MeDiNa e com os dados de campo. De forma complementar, foi realizada uma análise da influência da tensão residual de compactação com base na formulação proposta por Ehrlich e Mitchell (1994).

### **2.1. IMERutting**

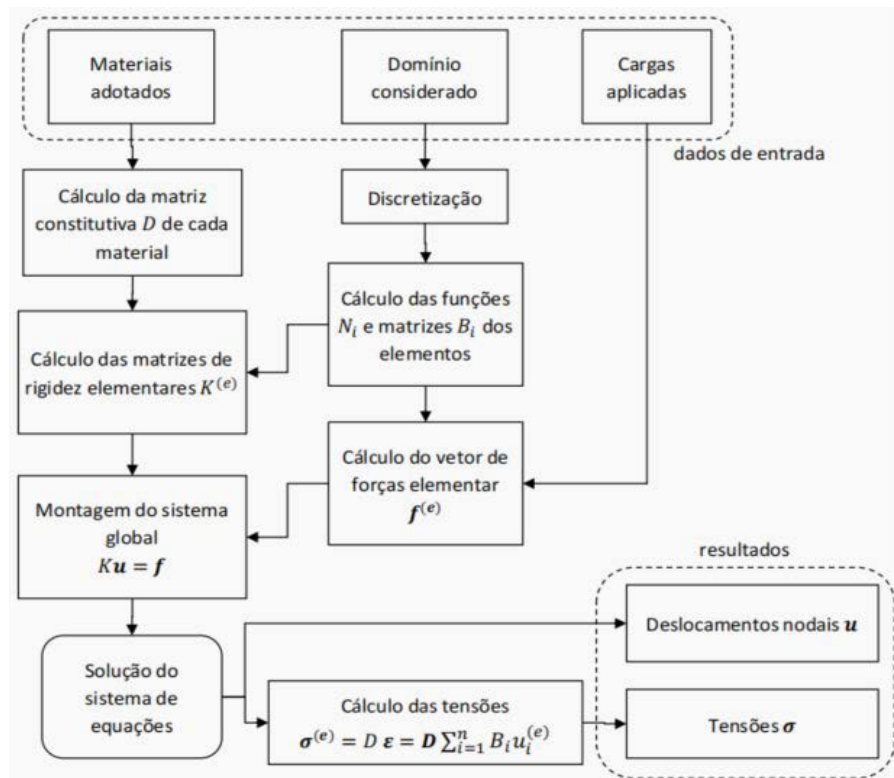
O IMERutting é uma ferramenta computacional em desenvolvimento para a análise numérica de tensões e da deformação permanente em pavimentos, com base em formulações mecanístico-empíricas e no Método dos Elementos Finitos. Neste trabalho, o software foi utilizado para determinar o estado de tensões no pavimento analisado e, a



partir dele, estimar a deformação permanente associada aos diferentes níveis de carregamento considerados. Uma visão geral do fluxo de processamento do programa é apresentada na Figura 1, enquanto a Figura 2 ilustra o módulo iMEF empregado nas análises.



Figura 1. Fluxo do IMERutting (Guimarães, 2025).





**Figura 2.** iMEF (Vale, Franco e Engenharia, 2016).

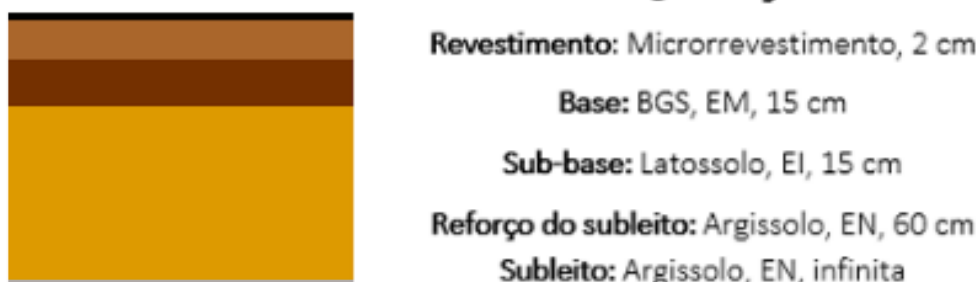
Para o caso estudado, os cálculos foram realizados com base em um modelo resiliente linearizado, adotando-se o módulo resiliente médio dos materiais reportados por Mota (2025).

## 2.2. Configuração estrutural analisada

A Figura 3 apresenta a configuração estrutural do trecho analisado, adotado com base em Mota (2025), bem como os dados utilizados nas simulações realizadas no IMERutting, no AEMC e no MeDiNa. As análises foram conduzidas para diferentes números de repetições de carga ( $N$ ), a fim de avaliar a evolução do afundamento de trilha de roda ao longo do carregamento do pavimento. Para as simulações no MeDiNa, considerou-se a premissa de Sistema Arterial Primário, com grau de confiabilidade de 85% e  $Z_\alpha = 1,0364$ , conforme o manual do programa. Nessas condições, o valor de ATR previsto pelo software é obtido pela expressão apresentada na Equação (1).

$$ATR_{\text{real}} = ATR_{\text{MeDiNa}} / (1 + 0,5 \cdot Z_\alpha) \quad (1)$$

Considerando que o subleito pode ser tratado, do ponto de vista mecânico, como um meio de extensão muito elevada, adotou-se no IMERutting uma camada com 168 cm de espessura, valor suficiente para representar de forma aproximada essa condição nas simulações numéricas.



**Figura 3.** Trecho de Mota (2025).

As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, os carregamentos considerados e as propriedades dos materiais empregados nas análises, incluindo o módulo resiliente médio e os parâmetros do modelo de Guimarães (2009). Adotou-se o eixo-padrão rodoviário como referência de carregamento, para fins de comparação com os ensaios de campo realizados com equipamento HVS.

**Tabela 1.** Dados dos carregamentos.

|   | Número de Ciclos (N) | ATR total (mm) | Carga por eixo (ton) |
|---|----------------------|----------------|----------------------|
| 1 | 500                  | 1,49           | 5,5                  |
| 2 | 1000                 | 1,61           | 5,5                  |
| 3 | 2000                 | 1,66           | 5,5                  |
| 4 | 4000                 | 2,01           | 5,5                  |
| 5 | 8000                 | 2,26           | 5,5                  |
| 6 | 12000                | 2,46           | 5,5                  |



|    |       |      |     |
|----|-------|------|-----|
| 7  | 16000 | 2,88 | 5,5 |
| 8  | 21003 | 2,83 | 5,5 |
| 9  | 25016 | 2,76 | 5,5 |
| 10 | 30000 | 2,62 | 5,5 |
| 11 | 35000 | 2,39 | 5,5 |
| 12 | 40000 | 2,39 | 5,5 |
| 13 | 45000 | 3,16 | 5,5 |

**Tabela 2.** Dados dos materiais.

|   | Material            | MEAS máx (g/cm <sup>3</sup> ) | MR médio | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\psi_3$ | $\psi_4$ |
|---|---------------------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | Micro revesti mento | -                             | 1500     | -        | -        | -        | -        |
| 2 | BGS, EM             | 2,245                         | 283      | 0,1674   | 0,2449   | 0,6775   | 0,0917   |
| 3 | Latossolo           | 1,65                          | 275      | 0,07     | -0,2354  | 1,5015   | 0,0585   |
| 4 | Argilossolo, EN     | 1,688                         | 293      | 5,5      | 0,9434   | 1,0151   | 0,0431   |

### 2.3. Estimativa da Tensão Residual Horizontal

A tensão horizontal residual de cada material foi estimada a partir dos dados apresentados na Tabela 3. Em termos gerais, adotaram-se parâmetros típicos associados a condições usuais de compactação. Para a carga estática equivalente, considerou-se o valor de 270 kN indicado na ficha técnica do rolo compactador vibratório Dynapac CA30PD Rhino, equipamento amplamente empregado em obras de compactação de aterros. Segundo o fabricante, esse equipamento possui peso operacional de 11.400 kg e largura de compactação de 2,13 m (Dynapac, 2025).

A razão de ruptura foi definida com base em valores típicos reportados por Duncan et al. (1980). Já o ângulo de atrito efetivo e o intercepto de coesão efetiva foram selecionados como valores intermediários dentro de faixas usuais, conforme Medina e Motta (2005) e Ortigão (2007).

No IMERutting, a tensão horizontal residual é calculada segundo Ehrlich e Mitchell (1994) e comparada com a tensão confinante estimada pelo Princípio dos Trabalhos Virtuais, adotando-se o maior desses valores como tensão confinante de entrada na formulação de Guimarães (2009). A partir dessa tensão, o modelo fornece a deformação permanente específica no ponto analisado do pavimento.

**Tabela 3.** Cálculo da tensão horizontal residual segundo Ehrlich e Mitchell (1994).

|   | Material  | Carga estática equivalente (kN) | Largura do rolo (m) | Razão de ruptura | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Ângulo de atrito (graus) | Intercepto de coesão efetiva | Tensão horizontal residual encontrada (kPa) |
|---|-----------|---------------------------------|---------------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------------------|
| 1 | BGS, EM   | 270                             | 2,13                | 0,71             | 22,45                                | 44                       | 0                            | 38,57                                       |
| 2 | Latossolo | 270                             | 2,13                | 0,89             | 16,50                                | 34                       | 25                           | 7,35                                        |



|   |                    |     |      |      |       |    |    |      |
|---|--------------------|-----|------|------|-------|----|----|------|
| 3 | Argilossolo,<br>EN | 270 | 2,13 | 0,85 | 16,88 | 30 | 20 | 7,97 |
|---|--------------------|-----|------|------|-------|----|----|------|

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são analisados os resultados obtidos para o pavimento estudado, considerando as tensões calculadas no IMERutting e sua comparação com os valores estimados no AEMC, bem como as previsões de deformação permanente em diferentes números de repetições de carga ( $N$ ). Adicionalmente, avalia-se o efeito da tensão residual de compactação nas respostas mecânicas e na estimativa do afundamento de trilha de roda.

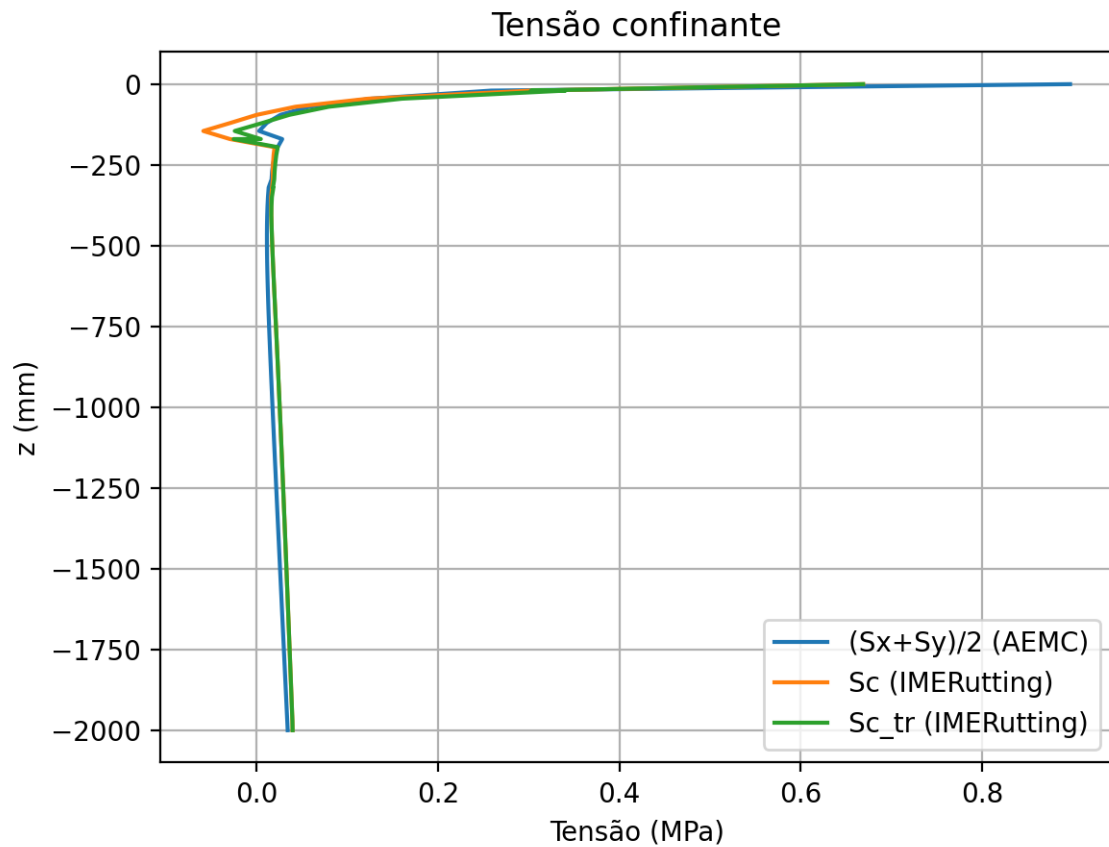
#### 3.1. Análise das Tensões Confinante e de Desvio

Como a estrutura do pavimento e o carregamento aplicado permanecem os mesmos nas simulações, a análise das tensões concentra-se na comparação entre as respostas mecânicas obtidas no IMERutting e no AEMC para o trecho analisado. Nesse contexto, o número de repetições de carga ( $N$ ) influencia a evolução da deformação permanente, mas não altera diretamente o estado de tensões associado a uma única aplicação de carga.

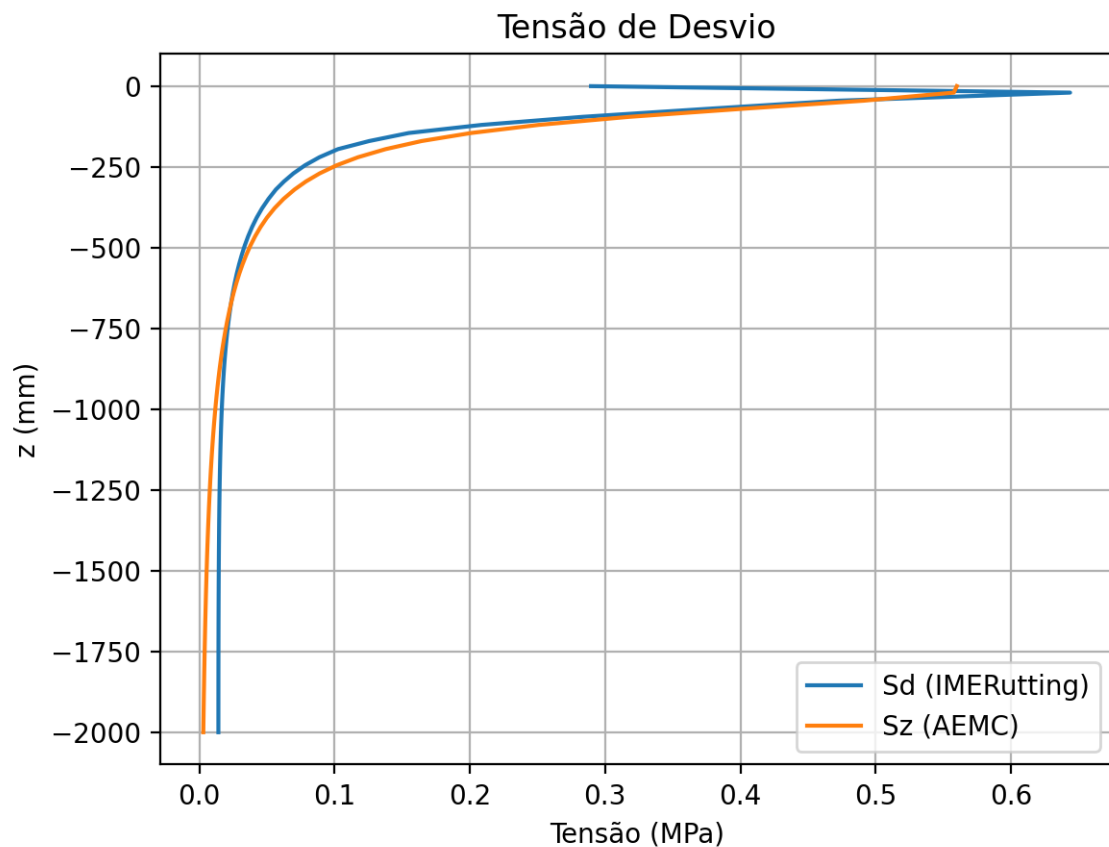
No presente trabalho,  $Sc$  representa a tensão confinante calculada pelo IMERutting, enquanto  $Sc_{tr}$  corresponde à tensão confinante calculada pelo IMERutting considerando a tensão residual de compactação. Já  $Sd$  representa a tensão desviadora calculada pelo IMERutting, ao passo que  $Sz$  representa a tensão desviadora obtida no AEMC.

Como o AEMC não fornece diretamente a tensão confinante empregada na formulação de deformação permanente, adotou-se como aproximação a tensão horizontal média, obtida a partir das tensões normais fornecidas pelo programa. Além disso, considerando que o AEMC não incorpora explicitamente o efeito do peso próprio das camadas, foi acrescentada à tensão horizontal média a parcela geostática correspondente. Dessa forma, a comparação foi realizada entre essa estimativa,  $(S_x + S_y)/2 + \rho gz$ , e as tensões confinantes calculadas no IMERutting,  $Sc$  e  $Sc_{tr}$ . Para a tensão desviadora, compararam-se diretamente os valores obtidos em cada ferramenta, isto é,  $Sd$ , no IMERutting, e  $Sz$ , no AEMC.

Na Figura 4, é apresentada a distribuição das tensões confinantes ao longo do perfil vertical do pavimento, na qual se pode constatar que os valores obtidos são muito próximos em todos os casos analisados.



**Figura 4.** Perfil de tensão confinante no pavimento analisado.







**Figura 5.** Perfil de tensão desviadora no pavimento analisado.

Observa-se que os perfis de tensão obtidos no IMERutting e no AEMC apresentam comportamento compatível ao longo da profundidade, com concordância geral quanto à tendência de variação das tensões no pavimento analisado. A distribuição da tensão desviadora ao longo do perfil é especialmente relevante porque permite identificar os níveis de solicitação efetivamente transmitidos às camadas inferiores da estrutura. Em uma aplicação ferroviária, essa informação poderia ser utilizada para avaliar a tensão atuante no subleito e compará-la com critérios de tensão admissível de subleitos ferroviários. Assim, o IMERutting poderia auxiliar não apenas na estimativa da deformação permanente acumulada em rodovias, mas também na verificação de níveis de solicitação compatíveis com a capacidade mecânica do material de fundação.

As diferenças mais pronunciadas entre as abordagens concentram-se nas regiões em que a consideração da tensão residual de compactação altera o confinamento governante, sobretudo nas camadas superiores e intermediárias. Em maiores profundidades, a contribuição geostática tende a se tornar predominante, reduzindo a influência relativa da tensão residual e aproximando os resultados entre as abordagens.

### 3.2. Análise da Deformação Permanente

A Tabela 4 apresenta os valores de deformação permanente previstos pelo IMERutting, com e sem a consideração da tensão residual de compactação, para os diferentes números de repetições de carga analisados. Esses resultados são comparados com as estimativas obtidas a partir dos dados de campo e com os valores fornecidos pelo MeDiNa, permitindo avaliar a capacidade preditiva do modelo em diferentes níveis de solicitação.

**Tabela 4.** Resultados da deformação permanente.

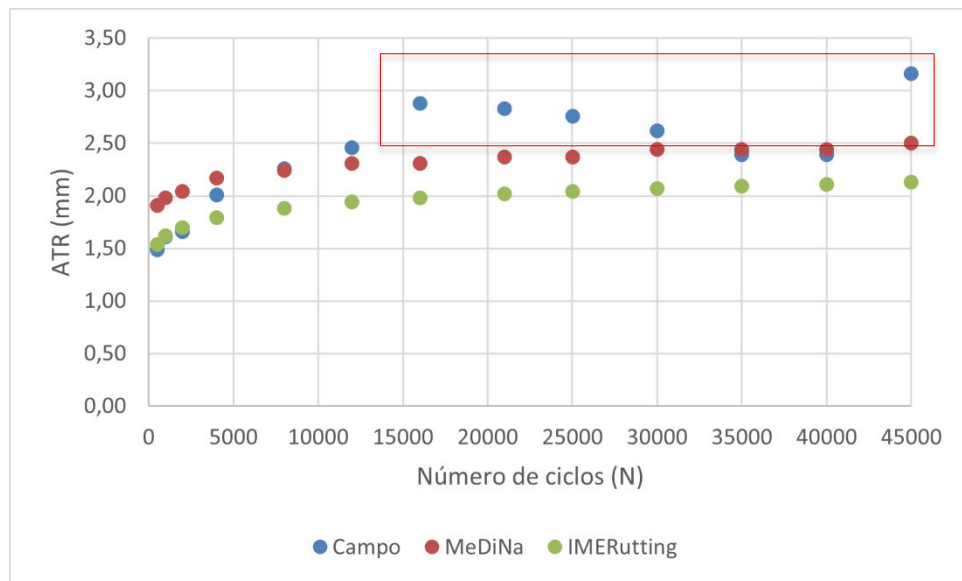
|    | Número de Ciclos (N) | ATR Total Mota (2025) (mm) | MeDiNa (mm) | IMERutting (mm) | IMERutting com tensão residual (mm) |
|----|----------------------|----------------------------|-------------|-----------------|-------------------------------------|
| 1  | 500                  | 1,49                       | 1,91        | 1,54            | 1,82                                |
| 2  | 1000                 | 1,61                       | 1,98        | 1,62            | 1,91                                |
| 3  | 2000                 | 1,66                       | 2,04        | 1,70            | 2,00                                |
| 4  | 4000                 | 2,01                       | 2,17        | 1,79            | 2,10                                |
| 5  | 8000                 | 2,26                       | 2,24        | 1,88            | 2,21                                |
| 6  | 12000                | 2,46                       | 2,31        | 1,94            | 2,27                                |
| 7  | 16000                | 2,88                       | 2,31        | 1,98            | 2,32                                |
| 8  | 21003                | 2,83                       | 2,37        | 2,02            | 2,36                                |
| 9  | 25016                | 2,76                       | 2,37        | 2,04            | 2,39                                |
| 10 | 30000                | 2,62                       | 2,44        | 2,07            | 2,42                                |
| 11 | 35000                | 2,39                       | 2,44        | 2,09            | 2,45                                |
| 12 | 40000                | 2,39                       | 2,44        | 2,11            | 2,47                                |
| 13 | 45000                | 3,16                       | 2,50        | 2,13            | 2,49                                |

A avaliação da deformação permanente total é mostrada na Figura 6, na qual pode ser observado que, a partir dos 16 mil ciclos, os dados de campo passam a apresentar valores ligeiramente mais elevados, com diferenças da ordem de 0,5 mm, que decrescem com o aumento do número de ciclos, comportamento este pouco usual do



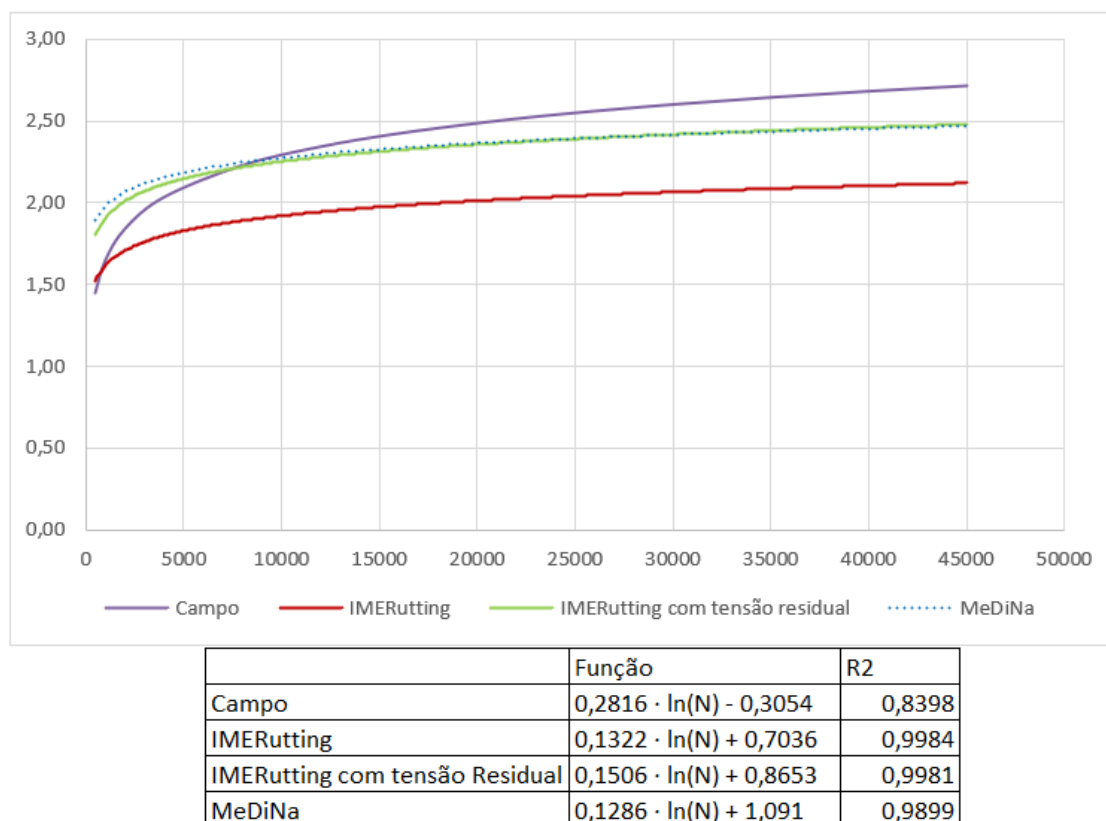


ponto de vista teórico. Como essa variação é pequena, é possível que ela esteja associada à variabilidade natural das medições em campo, uma vez que, diferentemente de condições mais controladas, o comportamento do pavimento em situação real está sujeito a maiores dispersões e incertezas experimentais.



**Figura 6.** Gráfico da deformação permanente entre os softwares analisados.

Em razão disso, foi ajustada uma tendência logarítmica aos dados de campo, com o objetivo de representar de forma mais consistente a evolução global do ATR em função do carregamento, suavizando oscilações pontuais que não representam a tendência física esperada. As funções estão mostradas a seguir:



**Figura 7.** ATR em função do número de ciclos de carregamento (N) para os dados de campo, MeDiNa, IMERutting e IMERutting com tensão residual, com ajuste logarítmico das séries.

A partir da Figura 7, observa-se que as previsões do IMERutting apresentam crescimento da deformação permanente com o aumento do número de ciclos, com tendência de redução da taxa de acréscimo nos níveis mais elevados de carregamento, comportamento compatível com a teoria do *shakedown* (Werkmeister, Dawson e Wellner, 2004).

Verifica-se, entretanto, que o IMERutting sem a consideração da tensão residual de compactação subestima de forma sistemática os valores obtidos em campo. Esse resultado evidencia a relevância da tensão residual de compactação na estimativa da deformação permanente, uma vez que, ao incorporá-la ao modelo, as previsões do IMERutting passam a representar de forma mais satisfatória a tendência global observada nos dados de campo, mesmo considerando o caráter aproximado dos parâmetros adotados nessa estimativa. Nessa condição, as diferenças em relação ao campo permanecem inferiores à ordem de 1 mm e, quando comparados aos resultados do MeDiNa, os valores previstos tornam-se praticamente coincidentes ao longo de todo o intervalo analisado.

Cabe destacar que, no contexto ferroviário, a interpretação da deformação permanente deve ser realizada com cautela, uma vez que sua relação com os defeitos geométricos observados no trilho é indireta e estruturalmente mais complexa do que no caso de pavimentos rodoviários. Enquanto no pavimento rodoviário o acúmulo de deformação permanente se manifesta de forma mais direta como afundamento de trilha de roda, na via permanente ferroviária a resposta medida no trilho depende da interação entre trilhos, fixações, dormentes, lastro, sublastro e subleito. Além disso, a ausência de



contato integral e permanente entre os componentes, especialmente na interface dormente-lastro, pode alterar a forma como as deformações das camadas inferiores se refletem na geometria da via. Soma-se a isso o fato de que parte dos defeitos geométricos, como desnivelamentos verticais e empenos, pode ser corrigida por intervenções de manutenção, como a socaria. Dessa forma, os resultados de deformação permanente apresentados neste estudo não devem ser interpretados como previsão direta de defeitos geométricos ferroviários, mas como indicadores da resposta mecânica das camadas de apoio e da tendência de acúmulo de deformações sob carregamentos repetidos.

#### **4. CONCLUSÃO**

Este estudo avaliou a capacidade preditiva do software IMERutting na estimativa do afundamento de trilha de roda em um pavimento submetido a diferentes números de repetições de carga, com base em dados experimentais de campo, comparações com o AEMC e com o MeDiNa, e análise complementar do efeito da tensão horizontal residual de compactação.

No que se refere à análise mecânica, observa-se compatibilidade entre os perfis de tensão obtidos no IMERutting e no AEMC, tanto para a tensão confinante quanto para a tensão desviadora, indicando coerência na representação do estado de tensões no pavimento analisado.

Quanto às previsões de afundamento, verifica-se que a consideração da tensão horizontal residual de compactação produz valores ligeiramente superiores aos obtidos sem esse efeito e, de modo geral, mais próximos dos dados de campo. Assim, sua incorporação contribui para melhorar a aderência das previsões à resposta observada, evidenciando a relevância do confinamento governante na estimativa da deformação permanente.

Em síntese, os resultados indicam que o IMERutting constitui uma ferramenta promissora para a análise mecanístico-empírica da deformação permanente em pavimentos, sendo capaz de representar satisfatoriamente a ordem de grandeza e a tendência de evolução do afundamento de trilha de roda no caso analisado. Embora neste trabalho sua aplicação tenha sido direcionada a um pavimento rodoviário, por causa da disponibilidade de dados de campo que possibilitaram a validação, sua formulação e estrutura de modelagem permitem adaptação para pavimentos ferroviários, ampliando seu potencial de uso em diferentes contextos de engenharia de transportes. Além disso, o software pode ser utilizado de forma integrada ao Sysrain, o que reforça sua versatilidade como ferramenta de análise e apoio ao estudo do comportamento mecânico de estruturas de pavimentação.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Instituto Militar de Engenharia (IME), pelo apoio institucional oferecido ao longo do desenvolvimento deste trabalho, aos professores envolvidos, pelas orientações e contribuições acadêmicas, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa PIBITI, que viabilizou a realização da pesquisa, e a Luís Nascimento, pela disponibilização dos dados utilizados neste estudo.



## 6. REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério dos Transportes. **Ferrovias**. Brasília, DF: Ministério dos Transportes, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/concessoes/ferrovias>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. *Programa MeDiNa: manual de ajuda*. Versão 2.0.0. Brasília, 2025. Manual eletrônico.
- DUNCAN, J. M.; BYRNE, P.; WONG, K. S.; MABRY, P. *Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses*. Berkeley, California, USA, 1980.
- DYNAPAC. *Rolo compactador CA30PD Rhino*. 2025. Disponível em: <https://pdf.dynapac.com/br/dynapac/products/pdf/33872>. Acesso em: 28 out. 2025.
- EHRlich, M.; MITCHELL, J. K. Working stress design method for reinforced soil walls. *Journal of Geotechnical Engineering*, [s. l.], v. 120, n. 4, p. 625–645, 1994.
- FOLLY, Priscila Oliveira; GUIMARÃES, Antônio Carlos Rodrigues. **Considerações sobre as tensões admissíveis em solos constituintes de subleitos de pavimentos ferroviários**. *Revista de Gestão e Secretariado – GeSec*, São José dos Pinhais, v. 16, n. 1, p. 01-14, 2025. DOI: 10.7769/gesec.v16i1.4518.
- GUIMARÃES, A. C. R. *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- GUIMARÃES, J. O. *Avaliação do efeito da utilização de geogrelha em reforço de camadas de pavimento rodoviário utilizando o MEF*. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2025. 199 p.
- HUANG, Y. H.; ROSE, J. G.; KHOURY, C. J. Hot-mix asphalt railroad trackbeds. *Transportation Research Record*, Washington, DC, n. 1095, p. 102-110, 1986.
- Heukelon, H., & Klomp, H. (1962). *A formulação das tensões admissíveis em solos para pavimentos*. Editora Técnica.
- MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. da. *Mecânica dos pavimentos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2005. 570 p.
- MOTA, B. C. *Comprehensive modeling of permanent deformation in soils and granular materials*. 2025. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, out. 2025. 229 p.
- OÑATE, E. *Structural analysis with the finite element method: linear statics*. v. 2: Beams, plates and shells. Barcelona: CIMNE, 2013.
- ORTIGÃO, J. A. R. *Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 385 p.
- ROSE, J. G.; LIU, S.; SOULEYRETTE, R. R. KENTRACK 4.0: a railway trackbed structural design program. In: **JOINT RAIL CONFERENCE**, 2014, Colorado Springs, Colorado. *Proceedings [...]* New York: ASME, 2014. DOI: 10.1115/JRC2014-3752.



VALE; FRANCO, F. R.; ENGENHARIA, E. *Relatório técnico RL-2014.03-002: validação do iMEF - ferramenta para cálculo de tensões pelo método dos elementos finitos*. [S. l.], 2016. 41 p.

**WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F.** Pavement design model for unbound granular materials. *Journal of Transportation Engineering*, v. 130, n. 5, p. 665-674, 2004.



## **NUMERICAL EVALUATION OF RUTTING IN HIGHWAY PAVEMENT UNDER DIFFERENT LOADING LEVELS USING THE IMERUTTING SOFTWARE**

### **ABSTRACT**

This study numerically evaluates rutting in a highway pavement subjected to different loading levels, based on experimental data reported by Mota (2025). The analyses consider the same pavement structure for different numbers of load repetitions,  $N$ , ranging from 500 to 45,000. The stress state induced by wheel loading is obtained in the IMERutting software using the Finite Element Method, adopting a linearized resilient model with the average resilient modulus of the materials. The calculated stresses are compared with those obtained from AEMC, while the permanent deformation predictions are compared with estimates derived from field data and with the results provided by MeDiNa. In addition, the influence of residual compaction stress is evaluated through simulations based on reference parameters from the literature and on the formulation proposed by Ehrlich and Mitchell (1994). The study contributes to the assessment of IMERutting's predictive capability under different loading levels and to the investigation of the sensitivity of mechanical responses to the consideration of residual compaction stress, making this software an important tool for predicting permanent deformations and allowable stresses in pavements in general.

**Keywords:** *Rutting, Permanent deformation, Highway pavements, Finite element method, IMERutting.*