EMPREGO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO EM MATERIAIS DE RODA-TRILHO FERROVIÁRIO

João Vítor Raimundo Silva e Silva, joao.vrs.silva@edu.ufes.br
Guilherme Fabiano Mendonça dos Santos, guilherme.f.santos@ufes.br
Cherlio Scandian, cherlio@hotmail.com

Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil
Laboratório de Tribologia e Dinâmica Ferroviária (LabTDF), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil

Resumo. O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo numérico tridimensional não-linear elástico, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), para a previsão do desgaste por deslizamento em materiais utilizados no sistema roda-trilho ferroviário. A abordagem visa reduzir o custo e o tempo associados a ensaios experimentais, utilizando simulação computacional como ferramenta de apoio à análise tribológica. O estudo emprega o software Abaqus® aliado à sub-rotina UMESHMOTION, escrita em Fortran®, e à técnica de malha adaptativa (ALE), permitindo a atualização geométrica contínua das superfícies desgastadas de corpo e contra-corpo, simultaneamente. A modelagem considera o contato entre materiais de roda e trilho, simulados na configuração tribológica do ensaio pino-disco (condição de deslizamento puro encontrada durante curvas), além da utilização e comparação de diferentes modelos para cálculo de profundidade e taxa de desgaste. As propriedades mecânicas e tribológicas dos materiais serão definidas a partir de dados experimentais e da literatura, e os resultados numéricos serão comparados com ensaios, para validação. Espera-se que o modelo proposto possibilite reduzir de forma eficiente a utilização de ensaios onerosos para se avaliar o desgaste por deslizamento em materiais ferroviários, contribuindo para o aprimoramento de análises tribológicas neste setor.

Palavras-chave: Desgaste por deslizamento. Pino-disco. Roda-trilho. Método dos Elementos Finitos. *UMESHMOTION*.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo dados da Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF, 2025), o volume transportado ultrapassou 48,82 milhões de toneladas apenas em junho de 2025, evidenciando a relevância do setor.

O contato roda-trilho está sujeito a condições severas de desgaste, especialmente, em regiões de deslizamento puro, que ocorrem durante curvas (LEWIS; OLOFSSON, 2004). Portanto, uma gestão eficiente de manutenção de materiais rolantes e de via é fundamental para otimizar a operação (MIRANDA et al., 2022). Parte desta gestão consiste no estudo do desgaste inerente a este tribossistema.

Segundo Hutchings e Shipway (2017), ensaios laboratoriais, como o pino-disco, reproduzem condições de deslizamento puro, mas demandam elevado custo, tempo e mão-de-obra especializada. Logo, a simulação computacional, aliada a modelos avançados de desgaste, surge como alternativa para acelerar o desenvolvimento e avaliação de materiais, reduzindo ensaios físicos financeiramente onerosos e permitindo otimizações.

A tribologia do contato roda-trilho tem sido amplamente estudada ao longo dos anos. Bolton e Clayton (1984), por exemplo, estudaram experimentalmente o comportamento de desgaste de diversos aços ferroviários em contato de rolamento-deslizamento. Estes tipos de estudos são fundamentais para entender os mecanismos de desgaste que ocorrem em condições reais de operação.

Já para o contato roda-trilho que ocorre durante curvas, ensaios na configuração pino-disco, onde o pino e o disco são fabricados a partir de amostras de trilho e roda, respectivamente, permitem uma avaliação controlada de materiais sob tais condições tribológicas. No entanto, o alto custo de equipamento e de tempo relacionados a estes ensaios têm motivado o desenvolvimento de métodos numéricos para prever e estudar o desgaste de forma mais eficiente.

Relacionado à simulação numérica, o Método dos Elementos Finitos (MEF) mostra-se uma ferramenta poderosa para estudar o desgaste. Yan e outros (2024) demonstraram a aplicação do método para prever o desgaste em diferentes materiais e aplicações, utilizando diferentes tipos de modelagem, métodos de atualização de geometria, equações de desgaste e tipos de otimização, destacando a capacidade destas em reduzir a dependência de ensaios laboratoriais.

O MEF permite modelar o comportamento não-linear dos materiais, incluindo deformação plástica, contato e atrito, tornando-o interessante para simulações tribológicas. Um dos softwares disponíveis para este fim é o Abaqus®, que permite o uso de sub-rotinas (como a *UMESHMOTION*), aliadas à técnica de malha adaptativa, possibilitando a atualização dinâmica da malha durante a simulação.

Já no que se refere à aplicação de equações de desgaste em simulações numéricas, a Lei de Archard (1953) é uma das mais utilizadas e pode ser vista na equação (1). Esta relaciona o volume de desgaste com a carga normal, a distância de

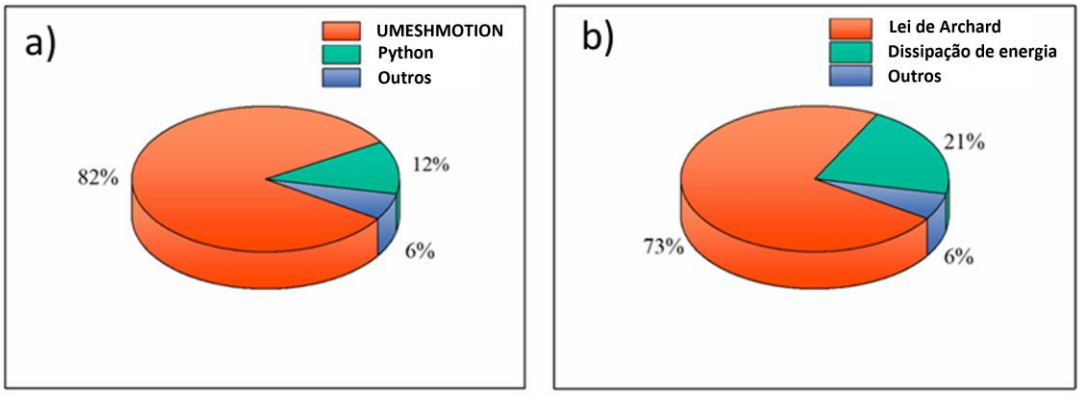
deslizamento e a dureza do material mais macio, oferecendo uma abordagem simples e eficaz. No entanto, há limitações, como a não consideração de efeitos térmicos, lubrificação e tensões transversais, o que tem levado ao desenvolvimento de equações mais avançadas (YAN et al., 2024), como por exemplo, simulações baseadas no modelo de dissipação de energia. A Figura 1 ilustra uma comparação entre os métodos de atualização de malha de elementos finitos e modelos de desgaste comumente utilizados neste tipo de pesquisa.

$$V = K\frac{F_n S}{H} \tag{1}$$

No qual:

- K é o coeficiente de desgaste [adimensional];
- S é a máxima distância deslizada [m];
- Fn é a carga normal aplicada [N];
- V é o volume de material removido [mm³];
- H é a dureza do material mais macio [N/m²].

Figura 1 – Comparativo da frequência de métodos comumente utilizados: (a) métodos de atualização de malha e (b) modelos de desgaste



Fonte: Adaptado de YAN, et al., (2024).

Aplicações do método têm sido investigadas em diferentes estudos. Bortoleto e outros (2013) reproduziram o desgaste na configuração pino plano-disco, considerando separadamente o corpo e o contra-corpo. Por outro lado, Bastola e outros (2024) aplicaram o método para reproduzir o desgaste em experimento esfera-disco, com desgaste simultâneo entre os materiais. Em termos de similitude com o comportamento dos corpos de prova durante o ensaio, a consideração do desgaste de ambas as partes ao mesmo tempo tende a produzir resultados mais fidedignos, embora represente uma análise mais complexa do que aquela que avalia apenas o desgaste de um espécime.

No contexto do sistema ferroviário, Silva e Silva e outros (2025) validaram simulações semi-analíticas através do método Global Incremental Wear Model (GIWM), de Hegadekatte e outros (2006), com resultados de ensaios pino-disco sob diferentes temperaturas.

Isto posto, a combinação de modelos e equações de desgaste, técnicas numéricas robustas e validação experimental possui campo para aprimorar o estudo do desgaste em sistemas ferroviários, como uma alternativa promissora de otimização de custos e prazos.

Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo numérico tridimensional não-linear elástica capaz de prever o desgaste simultâneo de materiais de roda e trilho em ensaios pino-disco, integrando diferentes modelos de desgaste através de sub-rotina *UMESHMOTION* escrita na linguagem Fortran® e técnica de malha adaptativa, no software comercial Abaqus®.

2. METODOLOGIA

A metodologia a seguir engloba tanto o método computacional quanto sua posterior validação experimental.

2.1. MATERIAIS

As propriedades mecânicas dos materiais de roda e trilho ferroviários utilizados como entrada nas simulações computacionais são mostradas na Tabela 1.

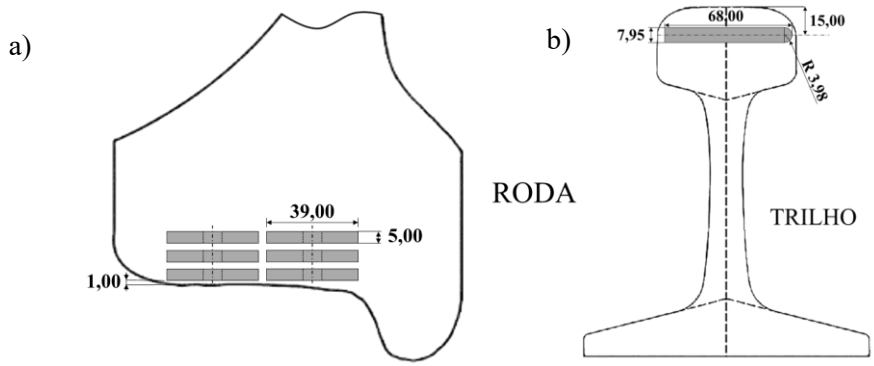
Tabela 1 – Propriedades mecânicas de pino e disco

Materiais	**Módulo de Elasticidade (GPa)**	**Coeficiente de Poisson**	**Dureza (HBW)**
Pino (Trilho)	200	0,3	368 ± 3
Disco (Rodas)	200	0,3	365 ± 3

Fonte: Produção do próprio autor.

A obtenção dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios pino-disco, cujos resultados servirão para a validação do método computacional seguem os desenhos esquemáticos da Figura 2.

Figura 2 – Desenho esquemático da obtenção dos corpos-de-prova de (a) disco e (b) pino (medidas em milímetros)

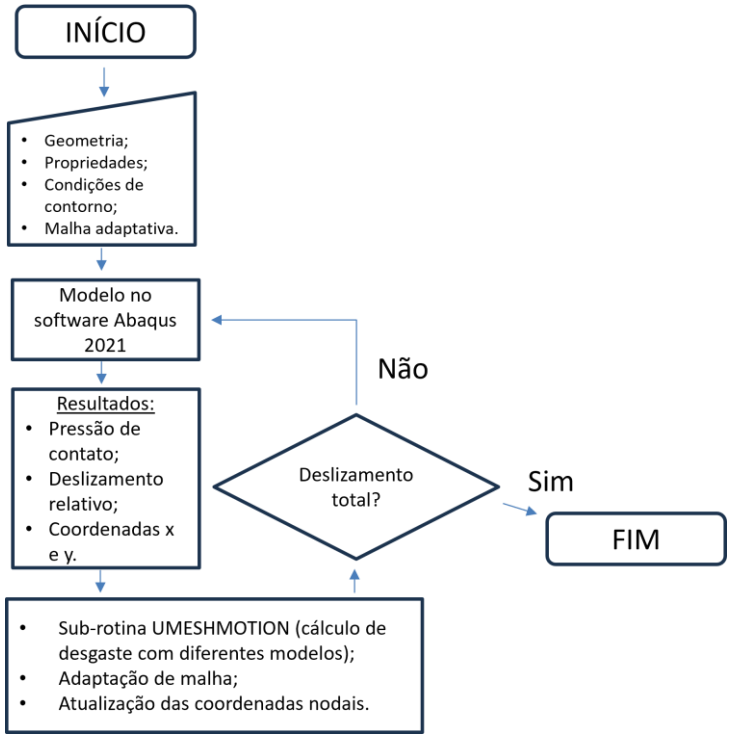


Fonte: Produção do próprio autor.

2.1. MÉTODO COMPUTACIONAL

A metodologia computacional está descrita no fluxograma, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma da simulação computacional



Fonte: Produção do próprio autor.

Além disso, os parâmetros básicos para a simulação 3D a serem realizadas podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas de pino e disco

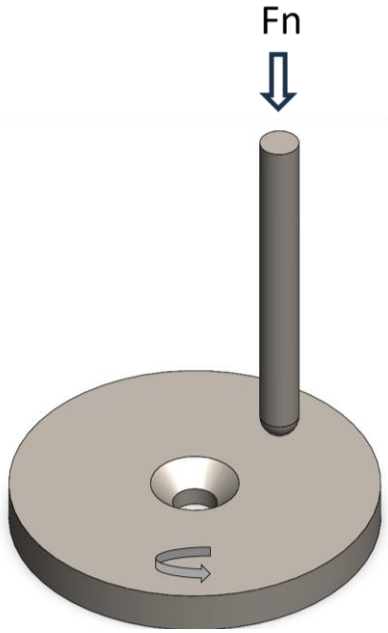
Categoria	**Tipo**
Formulação de deslizamento	*Finite Sliding*
Formulação do contato	Penalidade
Tipo de elemento	C3D8 - Linear (hexaédrico) 3D
Método de discretização	*Surface-to-surface*
Tipo de análise	Não-linear elástica quase-estática
Técnica de remalhamento e sub-rotina	Malha adaptativa - *UMESHMOTION*

Fonte: Produção do próprio autor.

2.2. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A Figura 4 apresenta o desenho esquemático do ensaio de desgaste pino-disco, que será utilizado para a validação dos resultados numéricos.

Figura 4 – Desenho esquemático do ensaio de desgaste pino-disco



Fonte: Produção do próprio autor.

Os parâmetros para a execução dos ensaios estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do ensaio pino-disco

Velocidade (m/s)	**Distância deslizada (m)**	**Pressão de contato inicial (GPa)**	**Condição de lubrificação**	**Temperatura de ensaio**
0,1	60	1,5 3,0	À seco	Ambiente

Fonte: Produção do próprio autor.

3. PLANO DE TRABALHO

A Tabela 4 apresenta o plano de trabalho, a partir de 12/2025.

Tabela 4 – Cronograma de execução das atividades

Período	Atividades
Mês 1-3	Revisão bibliográfica sobre os modelos de desgaste aplicáveis
Mês 3-5	Aplicação e comparação de diferentes equações de desgaste na simulação MEF 2D
Mês 5-7	Execução de ensaios de desgaste pino-disco para validação dos resultados numéricos
Mês 7-9	Redação do texto da qualificação
Mês 9	Defesa da qualificação
Mês 9-15	Aplicação e comparação de diferentes equações de desgaste na simulação MEF 3D
Mês 15-20	Escrita da tese e de artigos científicos
Mês 20	Submissão de artigos científicos em congressos e periódicos internacionais
Mês 21	Defesa da tese

Fonte: Produção do próprio autor.

4. RESULTADOS ESPERADOS

• Validação do modelo numérico tridimensional: concordância qualitativa entre os perfis de desgaste simulados e os obtidos experimentalmente no ensaio pino-disco;

• Comparação entre leis de desgaste: identificação da(s) equação(ões) de desgaste e das parametrizações que melhor reproduzem o comportamento observado para os materiais estudados;

• Mapas preditivos de desgaste: geração de mapas espaciais de profundidade e taxa de desgaste sobre as superfícies de roda e trilho, permitindo análise de sensibilidade em relação à pressão de contato e distância deslizada;

• Avaliação da técnica de remalhamento: demonstração da viabilidade do uso de malha adaptativa para simular desgaste simultâneo em corpo e contra-corpo, com análise do custo computacional e limites de estabilidade/elemento.

• Impacto prático e produção científica: redução estimada do número de ensaios experimentais necessários para avaliar variações de material e condição de contato;

5. REFERÊNCIAS

ANTF, **Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários.** Brasília, Brasil. www.antf.org.br/informacoes-gerais/, 2025;

BASTOLA, A., McCARRON, R., SHIPWAY, P., STEWART, D., DINI, D. **Experimental and numerical investigations of sliding wear behaviour of an Fe-based alloy for PWR wear resistance applications**. Wear, 540, 205186, 2024;

BOLTON, P. J.; CLAYTON, P. **Rolling-sliding wear damage in rail and tyre steels**. Wear, v. 93, n. 2, p. 145-165, 1984;

BORTOLETO, E. M., ROVANI, A. C., SERIACOPI, V., PROFITO, F. J., ZACHARIADIS, D. C., MACHADO, I. F., SOUZA, R. M. D. **Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test.** Wear, 301(1-2), 19-26, 2013;

HEGADEKATTE, V., HUBER, N., KRAFT, O. **Modeling and simulation of wear in a pin on disc tribometer.** International Joint Tribology Conference. p. 567-575, 2006;

HUTCHINGS I., SHIPWAY P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** Butterworth-Heinemann, 2017;

LEWIS, R., OLOFSSON, U. **Mapping rail wear regimes and transitions**. Wear 257, 721–729, 2004;

MIRANDA R.S., REZENDE A.B., FONSECA S.T., FERNANDES F.M., SINATORA A., MEI P.R. **Fatigue and wear behavior of pearlitic and bainitic microstructures with the same chemical composition and hardness using twin-disc tests**. Wear 494-495, 2022;

SILVA e SILVA, J.V.R. STREY, N. F., SANTOS, G.F.M., SCANDIAN, C. **Wheel-rail wear severity prediction using semi-analytical computational method**. Wear, p. 205824, 2025;

YAN, L., GUAN, L., WANG, D., XIANG, D. **Application and Prospect of Wear Simulation Based on ABAQUS: A Review**. Lubricants, 12, 57, 2024.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a empresa VALE S.A. Agradecemos também ao LabTecMec-UFES por patrocinar o evento.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.