



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS



CPTM

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM MODELOS DE ORDEM

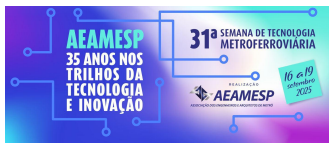
REDUZIDA PARA PREVISÃO DE DANO POR FADIGA EM VAGÕES

FERROVIÁRIOS

SOBRE OS AUTORES

Rodrigo Muniz de Farias Cordeiro - Engenheiro Mecânico formado pela FEI (Faculdade de Engenharia Industrial), com especialização em Engenharia Ferroviária pelo CEPFER (Centro de Pesquisas Ferroviárias) e MBA em gestão de negócios pela Fundação Dom Cabral. Possui mais de 18 anos de experiência no setor ferroviário e é atualmente Gerente de Engenharia de Desenvolvimento Avançado na Greenbrier Maxion.

Matheus Lima Silva - Engenheiro Mecânico formado pela Unicamp. Atua como engenheiro na Engenharia de Desenvolvimento Avançado da Greenbrier Maxion desde 2018.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Rodrigo Alves Augusto - Engenheiro Agrícola formado pela UNICAMP em 2005. Doutor em Engenharia Mecânica também pela UNICAMP em 2012. Trabalhou nas empresas General Motors do Brasil e Thyssenkrupp como engenheiro de simulação computacional. Juntou-se ao time da GBMX em 2023 como engenheiro de pesquisa e desenvolvimento com foco em análise estrutural de vagões.

Guilherme Simonato - Engenheiro Mecânico pela UTFPR em 2018, Mestre em Engenharia Industrial pelo IPB em 2019. Trabalhou na Continental ContiTech, General Motors e atualmente na GBMX, atuando na área de pesquisa e desenvolvimento de produto com foco em simulações computacionais.



APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM MODELOS DE ORDEM REDUZIDA PARA PREVISÃO DE DANO POR FADIGA EM VAGÕES FERROVIÁRIOS

INTRODUÇÃO

A metodologia atual para avaliação estrutural de vagões de carga no Brasil segue o estabelecido na norma *Association of American Railroads (AAR)*, dos Estados Unidos. O primeiro passo determinado pela norma é a avaliação do comportamento estático da estrutura do vagão. São aplicadas diferentes forças que simulam os principais inputs de carga que o vagão recebe durante operação, incluindo carregamentos no engate (tanto de tração quanto compressão), cargas verticais no prato pião e ampara-balanços, dentre outras. As forças geralmente apresentam valores consideravelmente mais altos do que o que ocorre durante a operação, de forma a garantir uma margem de segurança no projeto.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Por muito tempo, apenas a análise estática era requerida para validação do projeto estrutural de um vagão de carga no Brasil. Contudo, a partir do final da década de 1990, as ferrovias brasileiras passaram por grandes mudanças. As velocidades operacionais, que antes eram baixas, foram gradativamente aumentando. Os trens, que antes eram curtos, passaram a ter mais vagões e locomotivas. Os próprios vagões, por sua vez, passaram a carregar mais carga por eixo. Todo este cenário gerou um aumento na eficiência operacional. Ao mesmo tempo, porém, estas mudanças ocasionaram um aumento das forças envolvidas na operação ferroviária.

Trens mais longos e vagões mais pesados impactam diretamente nos níveis de força longitudinal, enquanto maiores velocidades operacionais impactam as forças geradas pela interação veículo-via.

Este novo cenário evidenciou a necessidade de uma análise estrutural mais detalhada, incluindo uma avaliação de fadiga. Ainda que a análise estática considere cargas superiores às que ocorrem na prática, cargas cíclicas abaixo desses níveis podem causar danos e levar a falhas, especialmente em juntas soldadas.

A norma AAR também estabelece, em seu capítulo 7, parâmetros para um estudo de fadiga em vagões de carga. Esta metodologia é baseada no uso das tabelas *Road Environment Percent Occurrence Spectra* (REPOS). As tabelas REPOS estão disponíveis para diferentes tipos de vagões e foram feitas a partir do processamento de sinais de força medidos durante operação em ferrovias americanas utilizando a técnica de Rainflow. Com isso, para cada carregamento (força no engate, força no prato pião,



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

força nos ampara-balanço) existe uma tabela composta por máximo, mínimo e número de ciclos.

A principal limitação desse método é que os dados utilizados são baseados na realidade ferroviária americana e não representam com precisão as ferrovias brasileiras, que podem apresentar cenários de dano mais ou menos severos, dependendo do trecho da via e do tipo de carga considerado. Comparações recentes feitas pelos autores, com base em medições de força no engate realizadas nos últimos anos em uma ferrovia representativa no Brasil, mostraram um aumento significativo no dano por fadiga (Figura 1). As forças registradas em 2017 apresentaram uma estimativa de dano semelhante à obtida com as tabelas 7.29 e 7.30 (carga do engate em vagões tipo hopper) do Capítulo 7 da AAR. No entanto, novas medições realizadas entre 2022 e 2024 revelaram um aumento acentuado no dano à fadiga associado à dinâmica longitudinal do trem. Os níveis de dano são quase 5 vezes superiores aos indicados pelas tabelas REPOS.

Outro aspecto importante a ser considerado é que esse método não leva em conta os efeitos combinados de diferentes cargas, uma vez que considera que cada força atua de forma independente na estrutura. Essa simplificação, no entanto, ignora o fato de que na operação real as diferentes cargas, como engate, vertical e prato pião, atuam de forma simultânea na estrutura e interagem entre si. Essa interação pode alterar significativamente o estado de tensões em pontos críticos da estrutura, resultando em



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

níveis de dano à fadiga diferentes daqueles previstos quando se consideram apenas os carregamentos isolados.

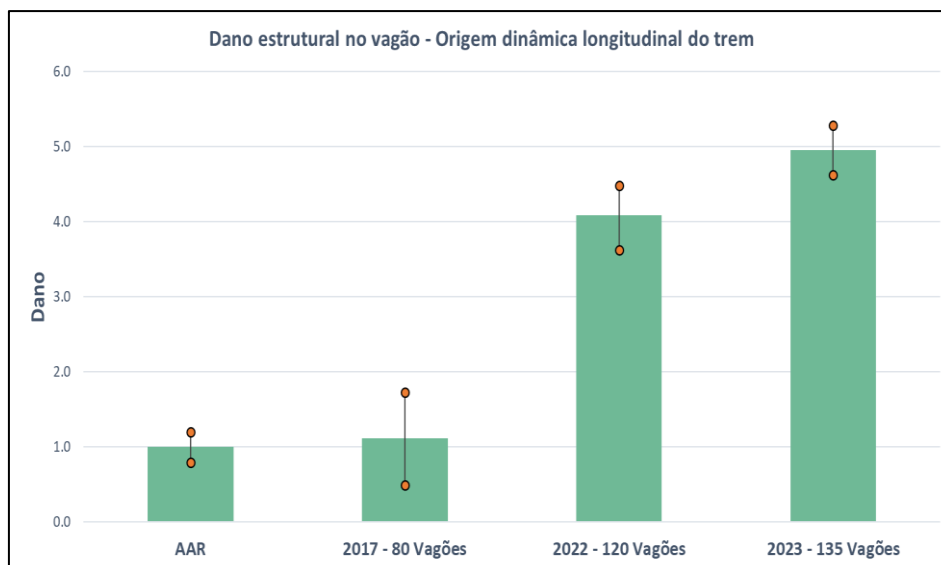


Figura 1 – Evolução do dano em fadiga oriundo da dinâmica longitudinal do trem.

Diante disso, torna-se necessária uma análise de fadiga mais detalhada para avaliar corretamente a durabilidade dos vagões de carga no Brasil. Essa metodologia inclui a aquisição de uma quantidade representativa de dados de instrumentação em ferrovias nacionais, abrangendo as principais cargas aplicadas, e levando em conta os diferentes cenários operacionais. Os dados adquiridos devem ser utilizados como entrada em uma análise de fadiga no domínio do tempo, que permite considerar os efeitos combinados de diferentes cargas. A desvantagem desse método está no custo computacional elevado. Em casos que exigem grandes volumes de dados para mapear completamente o cenário operacional, uma análise detalhada torna-se quase inviável.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

É por isso que os autores apresentam neste artigo um modelo de ordem reduzida (ROM), utilizando técnicas de Inteligência Artificial (IA), com o objetivo de reduzir o custo computacional da análise detalhada, mantendo a precisão e, consequentemente, viabilizando a realização de uma análise de fadiga completa e aprofundada.

DESENVOLVIMENTO

O primeiro passo para o desenvolvimento do modelo de ordem reduzida (ROM) é a definição do modelo base de elementos finitos (FEA) que será utilizado para o treinamento do ROM. O modelo FEA representa metade de 1 vagão graneleiro, utilizando de considerações de simetria para a redução do problema. São utilizados elementos de casca e sólidos para modelar a estrutura, resultando em 1,000,770 nós.

São considerados 4 diferentes casos de carga que posteriormente serão combinados junto ao sinal temporal para estabelecer a resposta da estrutura. O primeiro caso contempla as forças de tração que chegam à estrutura através do engate e são aplicadas no batente dianteiro do vagão. O segundo caso, por sua vez, contempla as forças de compressão, que são também oriundas da dinâmica longitudinal do trem e chegam à estrutura através do engate; sendo, contudo, aplicadas ao batente traseiro do vagão. O terceiro caso de aplicação de carga considera as forças verticais atuantes na estrutura devido à interação entre veículo e via. O último caso representa a carga transportada pelo vagão, exercendo pressões nas laterais e assoalho da caixa.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

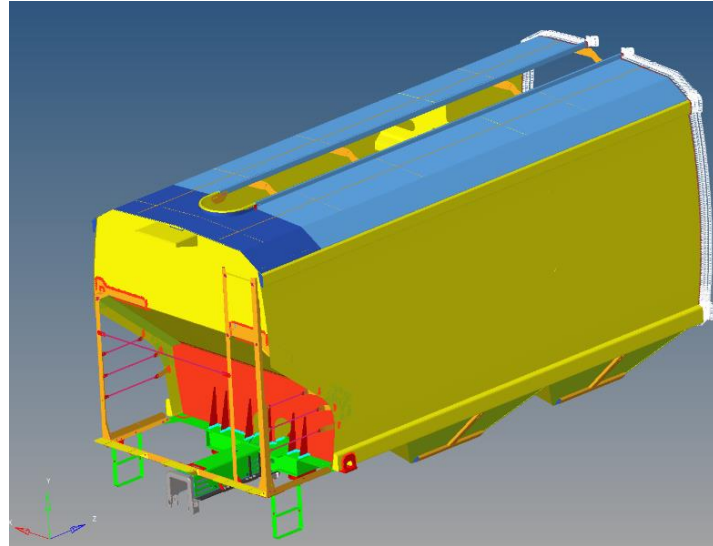


Figura 2 – Modelo de elementos finitos de metade de um vagão.

Uma primeira análise estática foi feita utilizando o modelo de elementos finitos e os 4 casos de carregamento para avaliar a resposta estrutural do vagão. Durante esta análise, foram definidas 2 regiões do vagão representativas do ponto de vista de análise de fadiga, para um maior detalhamento e posterior criação do modelo de ordem reduzida.

A primeira região de interesse (figura 3) está localizada próxima à junção entre a viga central e a primeira rampa do vagão, próximo à cabeceira. A resposta desta região é dependente tanto dos esforços longitudinais (tração e compressão), bem como dos esforços verticais. Esta região foi selecionada por ter uma alta sensibilidade de diferentes carregamentos.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

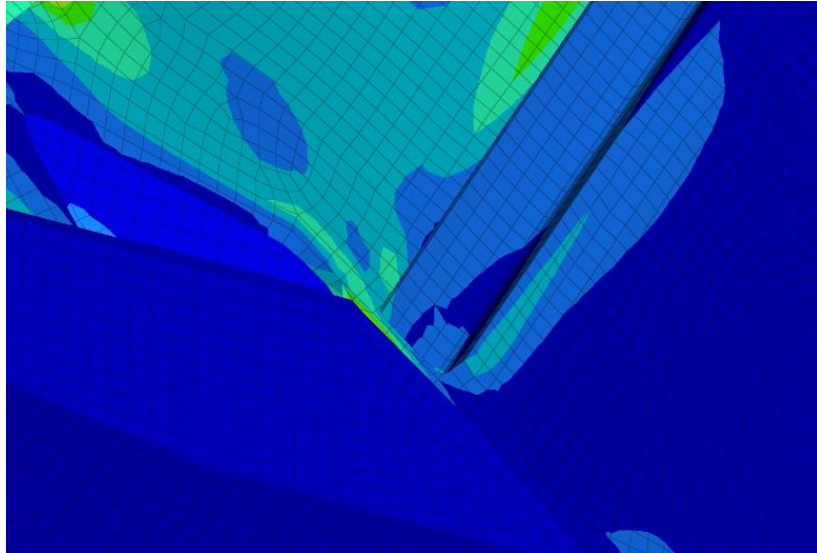


Figura 3 – Região de interesse para o desenvolvimento do ROM.

A segunda região de interesse (figura 4) está localizada próximo ao centro do vagão na junção de 2 rampas de portas. A resposta desta região tem uma alta sensibilidade em relação ao carregamento vertical e uma baixa sensibilidade dos esforços longitudinais. No desenvolvimento do modelo de ordem reduzida, apenas os resultados de vida em fadiga nestas duas regiões serão considerados. O modelo irá levar em conta toda a estrutura do vagão, porém apenas os resultados nas regiões definidas acima serão disponibilizados.

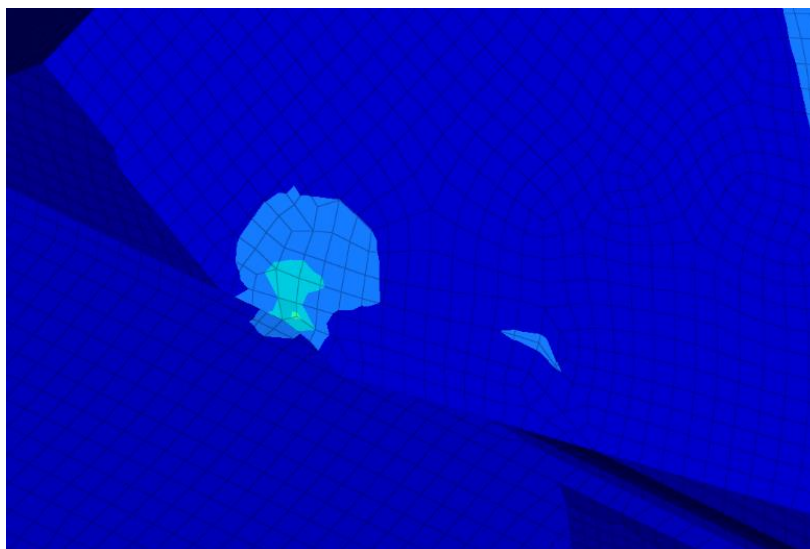


Figura 4 – Região de interesse para o desenvolvimento do ROM.

Uma vez que o modelo de elementos finitos e as regiões de interesse foram definidas, o próximo passo no desenvolvimento do modelo de ordem reduzida é a seleção dos dados de entrada para treinamento. Para isso, foram considerados dados coletados por um vagão graneleiro instrumentado que operou em um trecho de ferrovia representativo por um período próximo a um ano.

O vagão instrumentado coletou informações de esforço longitudinal (forças de tração e compressão no engate) e esforços verticais oriundos da interação veículo-via. Durante a coleta, o vagão operou em diferentes posições no trem, de forma a mapear os impactos de diferentes variáveis nas forças medidas. Uma vez que uma posição crítica no trem foi definida, o vagão passou a operar nesta mesma posição, coletando os dados de força.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 5 – Vagão instrumentado.

As figuras 6 e 7 apresentam o sinal temporal medido durante uma única viagem. Os trechos nos quais o vagão está parado foram removidos. Nota-se que, mesmo ao se reduzir o sinal, uma única viagem contém cerca de 60 horas de dados, o que inviabiliza uma análise detalhada de fadiga de forma convencional considerando muitas viagens.

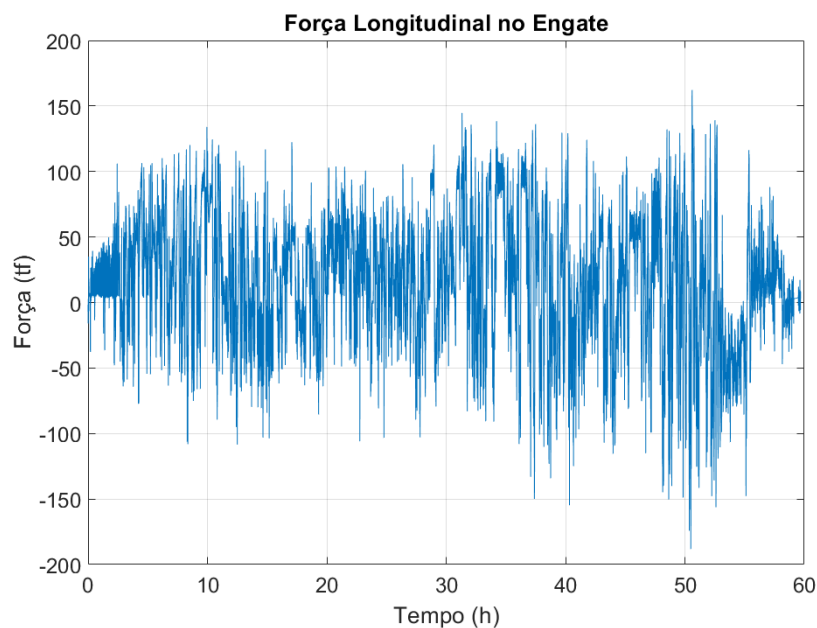


Figura 6 – Força medida no engate durante uma viagem.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Para o treinamento do modelo de ordem reduzida, foram separados trechos de sinal com duração de 1 minuto. Os trechos foram definidos de forma a representar diferentes condições de operação, amplitude e combinação das forças atuantes no vagão.

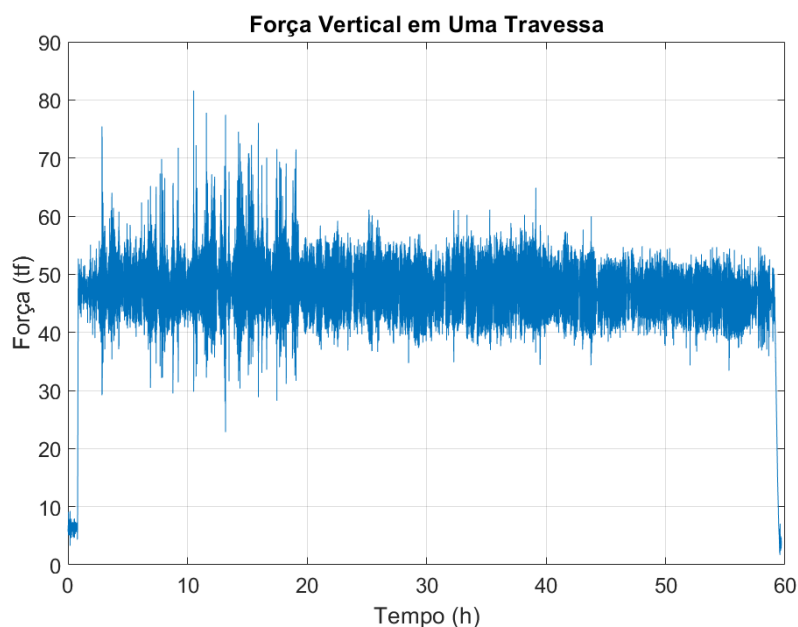


Figura 7 – Força vertical medida em uma travessa do vagão durante uma viagem.

A etapa final antes de iniciar o treinamento do modelo de ordem reduzida é definir os parâmetros que serão considerados na análise de fadiga. O modelo de elementos finitos foi utilizado, junto com as cargas medidas, assumindo superposição linear entre os carregamentos.

A metodologia de fadiga adotada foi a “*Stress-Life*” utilizando a tensão máxima principal absoluta nas regiões de interesse. A curva de fadiga adotada foi a FAT-90, uma

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

curva S-N desenvolvida para juntas soldadas pelo *International Institute of Welding* (IIW). Não foram considerados modelos para correção da tensão média.

MODELO DE ORDEM REDUZIDA

A estimativa do dano em fadiga é dividida em duas etapas. A primeira etapa corresponde à transformação dos dados de entrada medidos (força no engate e força vertical) em um panorama de tensão. Durante o treinamento da primeira rede neural, o modelo de elementos finitos e os dados aquistados, divididos em intervalos de 1 minuto, são utilizados. O treinamento foi realizado com a função de ativação ReLu, utilizando 2 camadas com 20 neurônios cada. Foram definidas 100 épocas.

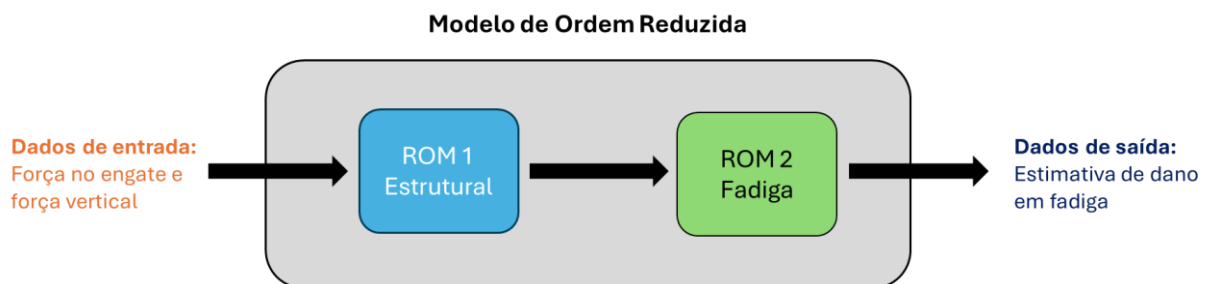


Figura 8 – Esquema do modelo de ordem reduzida.

A segunda etapa consiste no cálculo do dano em fadiga para um panorama de tensão, que é calculado na primeira etapa. A entrada desta etapa são valores estatísticos (RMS, média, desvio padrão) de cada pacote de dados de 1 minuto. Esta segunda rede neural é treinada utilizando o modelo de fadiga definido com os seguintes parâmetros:



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

curva de fadiga FAT-90, acúmulo de dano linear (Palmgren-Miner) e sem correção de tensão média. Os treinamentos foram realizados com a função de ativação ReLu com a utilização de 3 camadas com 100 neurônios cada. Foram definidas 3000 épocas.

RESULTADOS

Para o treinamento do modelo de ordem reduzida, foram utilizados 355 trechos de sinal com duração de 1 minuto. Cada trecho é composto pelos sinais de esforço de tração no engate, esforço de compressão no engate e força vertical. 80% dos dados foram utilizados para treinamento, enquanto 20% para teste.

A primeira rede neural apresentou uma alta acuracidade para ambos os pontos da estrutura considerados nesta análise. Os valores do coeficiente de determinação (R^2) para ambos foram de 1, enquanto os valores de perda foram de $2,347e-8$ no ponto 1 (figura 3) e de $3,197e-7$ no ponto 2 (figura 4).

A segunda rede neural também apresentou resultados com uma boa acuracidade. Para o primeiro ponto, o valor do coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,9103. Para o segundo ponto, o coeficiente de determinação foi de 0,9969.

Os resultados do treinamento mostram que o modelo de ordem reduzida é capaz de produzir resultados de dano em fadiga para 2 pontos da estrutura de um vagão de forma satisfatória. Analisando do ponto de vista de eficiência computacional, uma vez que o modelo está treinado, o processamento de uma viagem inteira do vagão (cerca



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de 60 horas úteis de dados) é feito em menos de 12 horas. É necessário considerar, porém, que o custo computacional para o treinamento do modelo de ordem reduzida é consideravelmente maior do que o tempo para a construção de um modelo convencional e análise para uma única viagem.

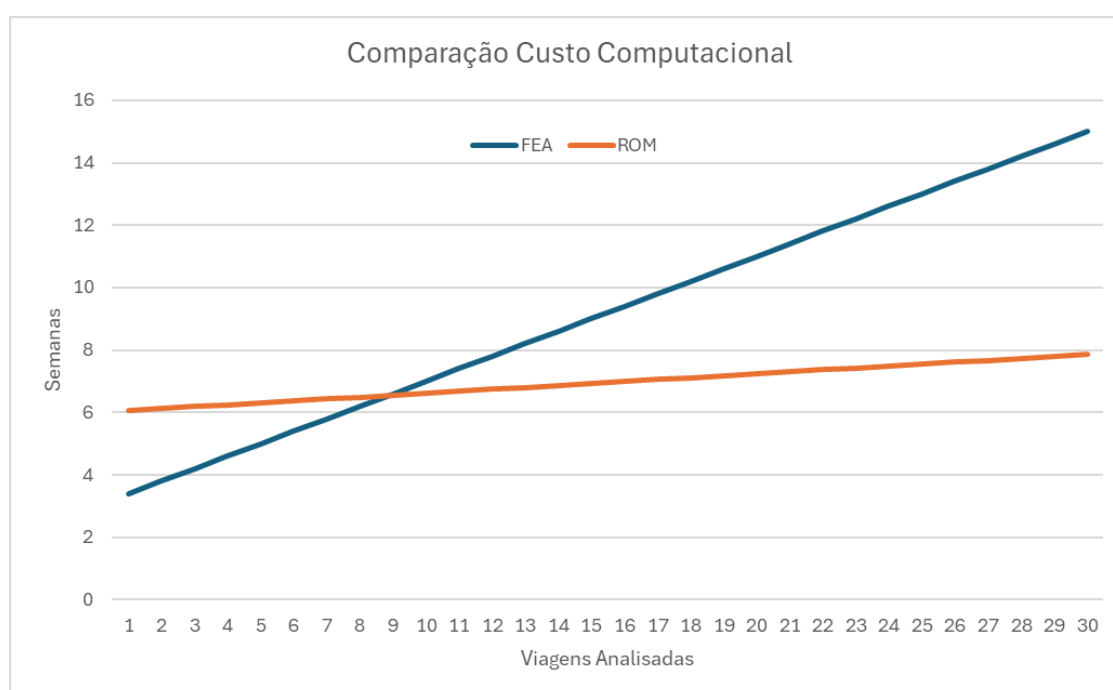


Figura 9 – Comparação de custo computacional entre as metodologias.

A vantagem do modelo aqui proposto é quando existe a necessidade de analisar uma grande quantidade de dados de viagem, de forma a mapear diferentes comportamentos e cenários de operação de um vagão. A figura 9 acima mostra uma comparação de custo, em semanas, entre a metodologia convencional e a utilizando um modelo de ordem reduzida. Para o caso em estudo, o modelo ROM se mostra vantajoso



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

a partir de 9 viagens analisadas. A partir deste ponto, os ganhos pela utilização do ROM se mostram bastante expressivos.

CONCLUSÕES

As condições operacionais em constante evolução nas ferrovias brasileiras exigem análises estruturais mais detalhadas, com o uso de medições de campo de longo prazo e métodos avançados para avaliação de fadiga.

Nesse contexto, o uso de processos convencionais pode se tornar inviável, devido ao grande volume de dados e aos altos custos computacionais envolvidos. Métodos modernos de Inteligência Artificial permitem o desenvolvimento de Modelos de Ordem Reduzida (ROM), que mantêm a precisão das simulações tradicionais, ao mesmo tempo em que reduzem significativamente a demanda computacional.

O modelo ROM apresentado neste estudo demonstra uma redução expressiva de custo e é capaz de fornecer respostas quase em tempo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aggarwal, C. C. 2023. Neural Networks and Deep Learning: A Textbook. Springer.

Association of American Railroads, 2023. Manual of Standards and Recommended Practices, Section C – Part II, Washington, D.C.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Géron, A. 2019. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow (2nd ed.). O'Reilly Media.

Hobbacher, A. F., & Baumgartner, J. 2024. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components (3rd ed.).

Johannesson, P. & Speckert, M. 2014. Guide to load analysis for durability in vehicle engineering.

Smolyakov, V. 2024. Machine Learning Algorithms in Depth. Manning Publications.

Suresh, S, 1998. Fatigue of materials, 2nd Edition, Cambridge University Press.