

Reavaliação do Trem-Tipo Ferroviário Brasileiro

Pedro Lyra^{1,2*}, João Junqueira³, Fernando Stucchi¹, Marcelo Botelli³, Luciano Oliveira⁴

¹ EPUSP, Av. Prof. Luciano Gualberto, n° 380, 05.508-010, São Paulo – SP

² IMT, Praça Mauá, n° 1, 09.580-900, São Caetano do Sul – SP

³ MRS Logística, Av. Brasil, n° 2001, 36.060-010, Juiz de Fora - MG

⁴ Vale, Av. Dante Michelini, n°5500, 29.090-900, Vitória - ES

e-mail: pedrolyra85@gmail.com, joao.junqueira@mrs.com.br, frstucchi@gmail.com,
marcelo.botelli@mrs.com.br, oliveira.luciano@vale.com

Resumo Comparando os índices de participação na matriz de transportes e densidade do modal ferroviário do Brasil com outros países de grandes dimensões territoriais, ainda há muito espaço para o seu crescimento. Com o estímulo ao aumento da eficiência e ampliação do transporte de cargas, muitos desafios vêm sendo impostos ao sistema ferroviário. Neste contexto, a definição do trem-tipo ferroviário brasileiro é imprescindível para possibilitar a aplicação de estratégias de integração da malha ferroviária nacional, permitindo o maior desenvolvimento desse modo de transporte. A norma ABNT NBR 7189 que define as cargas móveis para o projeto estrutural de obras ferroviárias teve sua última versão publicada em 1985 e cancelada em 2015, porém, visto a sua obsolescência, operadoras e concessionárias vêm adotando referências internacionais e até mesmo definindo seus próprios trens-tipos operacionais. Dessa forma, este trabalho vem apresentar o desenvolvimento dos estudos de reavaliação do trem-tipo ferroviário brasileiro para a elaboração da nova norma de cargas móveis para o projeto de obras ferroviárias.

Palavras-Chaves: Infraestrutura; Trem-tipo ferroviário; Pontes ferroviárias.

1. INTRODUÇÃO

A principal finalidade do transporte ferroviário é promover o desenvolvimento econômico de uma região através do escoamento de pessoas, de bens e de mercadorias e, assim, movimentar a economia [3]. Atualmente, o modal ferroviário brasileiro responde por 15% do transporte de cargas [2]. Há ainda muito espaço para crescimento, quando comparados os índices de participação da matriz de transportes e densidade da malha ferroviária com outros países de dimensões continentais. Para o modelo econômico atual, principalmente de exportação de commodities, o modal ferroviário se encaixa muito bem, pois as principais cargas movimentadas por trem são grãos, minério de ferro, cimento, derivados do petróleo, containers, produtos siderúrgicos, entre outros.

Com o estímulo ao aumento da eficiência e ampliação do transporte de cargas, alguns desafios vêm sendo impostos ao sistema ferroviário. São eles: aumento de carga por eixo; aumento da densidade operacional; aumento das velocidades médias autorizadas; aumento da extensão dos comboios ferroviários; manutenção da infraestrutura sem a paralização da operação ou em intervalos reduzidos; rigorosas metas de trem hora parado, acidentes ferroviários e acidentes pessoais. Diante disso, se faz cada vez mais necessário o equilíbrio entre produção e manutenção, de forma que a manutenção impacte da menor forma possível nos resultados de produção, mantendo-se níveis satisfatórios de segurança estrutural e, conseqüentemente, operacional. [4]

Analisando as pontes e viadutos como componentes do sistema ferroviário, a sua manutenção pode impactar de várias formas

na eficiência deste modo de transporte, tais como a necessidade de intervalos operacionais para a realização de intervenções, restrições de velocidades, materiais e serviços de alto custo, equipamentos complexos e mão de obra especializada [5]. Desta forma, concessionárias e operadoras ferroviárias vem aumentando os seus investimentos em processos que permitam obter maior eficiência em custos, redução de impactos e garantias do equilíbrio entre produção e segurança operacional.

Dentre todos os processos que corroboram com a eficiência e segurança do sistema ferroviário, está o atendimento às normalizações correntes, uma vez que estas têm como objetivo o estabelecimento de diretrizes e regulamentações para o desenvolvimento técnico. Nesse contexto de obras de arte especiais ferroviárias, uma das principais referências normativas para a definição dos carregamentos para dimensionamento e avaliação de pontes e viadutos é a ABNT NBR 7189, que definia os trens-tipos ferroviários brasileiros que representam a carga móvel a ser considerada nos projetos de construção e avaliação estrutural de obras existentes.

A ABNT NBR 7189 foi cancelada em 2015, o que vem prejudicando o desenvolvimento do transporte ferroviário brasileiro, visto que uma referência normativa nacional tem um objetivo não somente de definir e regulamentar os trens-tipos ferroviários para projetos e verificações de obras novas e existentes, mas também de direcionar e conduzir as estratégias de integração da malha ferroviária brasileira.

Desta forma, este artigo tem o objetivo de apresentar o método de estudo que vem sendo empregado para a avaliação das cargas móveis para o projeto estrutural de obras ferroviárias, tendo como base os dados efetivos de pesagem dos veículos nos principais corredores ferroviários brasileiros. Para o melhor entendimento, é importante a compreensão dos conceitos de Teoria de Confiabilidade e de Estado Limite Último, e em especial, o de Fadiga.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estados Limites Últimos

Os estados limites últimos podem ser considerados nos projetos de estruturas dependem dos tipos de materiais de construção empregados e devem ser especificados pelas normas referentes ao projeto de estruturas com eles construídas. No projeto de uma obra de arte, usualmente devem ser considerados os estados limites últimos caracterizados por: perda de equilíbrio, global ou parcial, admitida a estrutura como um corpo rígido; ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais; transformação da estrutura, no todo ou em parte, em sistema hipostático; instabilidade por deformação; instabilidade dinâmica.

2.2 Fadiga

Uma estrutura sujeita a solicitações de esforços com intensidades variáveis ao longo do tempo pode, após um certo número de ciclos de carregamento, entrar em processo de ruptura sem que tenha atingido o seu limite de resistência estática. Este fenômeno é conhecido como fadiga. O fato de a ruptura por fadiga surgir de cargas de utilização, podendo ser brusca e sem aviso prévio, torna esse fenômeno ainda mais grave [7].

Pontes ferroviárias, em especial, estão entre as estruturas com maiores índices de danos decorrentes de fadiga. O aumento das cargas por eixo de tráfego, da quantidade de veículos em circulação – e conseqüente aumento de ciclos de carregamento – e das velocidades operacionais registradas nos últimos anos justificam a crescente preocupação com essas estruturas em relação ao estado limite de fadiga [6].

2.3 Confiabilidade Estrutural

A análise de confiabilidade estrutural exige a determinação das variáveis relevantes e a equação de estado limite. A equação do estado limite é uma função $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ desses parâmetros e pode ser formulada como definido na equação abaixo.

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = R - S \quad (1)$$

onde R representa a resistência, resposta ou desempenho e S representa o efeito do carregamento. A equação do estado limite define a superfície de falha que separa a

região de sobrevivência da região de falha. O domínio de sobrevivência e o domínio de falha são definidas nas equações abaixo, respectivamente.

Domínio de sobrevivência:

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0 \quad (2)$$

Domínio de falha:

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0 \quad (3)$$

Da equação do estado limite, apresentada anteriormente, é possível obter a probabilidade de falha (P_f), pode ser derivado considerando a função de densidade de probabilidade de R e S, como apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** A quantidade (R-S) é uma variável aleatória com sua função de densidade de probabilidades.

A falha estrutural acontece quando o efeito do carregamento excede a resistência. Então, a probabilidade de falha, indicado em cinza na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 3, é igual a probabilidade de $S > R$.

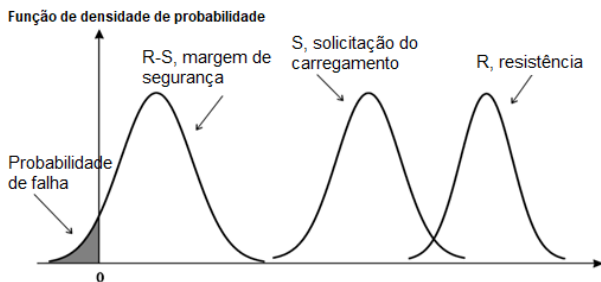


Fig. 1 Funções de densidade de probabilidade de carregamento, da resistência e da margem de segurança (Fonte: Adaptado de [8])

3. METODOLOGIA

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as etapas que fazem parte da metodologia para a avaliação do efeito do trem-tipo nos elementos estruturais primários (por exemplo a longarina) e secundários (por exemplo a transversina) de uma ponte ferroviária através dos trens tipos globais e locais, a fim de fornecer informações para a nova norma de cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias.

Vale ressaltar que, na malha ferroviária brasileira, há a predominância de dois tipos de bitolas: a padrão, chamada de larga (1,60 metros); e a métrica (1,00 metros). A bitola é a denominação que se dá para o comprimento

do seguimento retilíneo entre as faces internas dos boletos dos trilhos. Sendo assim, o estudo será realizado diferenciando-se os dois cenários separadamente.

Como os dados de peso por eixo dos vagões utilizados nos estudos são as medições efetivas dos veículos ferroviários, também serão considerados nos estudos os carregamentos reais anômalos identificados nas pesagens, tais como: sobrepeso de vagões; sobrepeso de eixos e/ou truques; desbalanceamentos transversais entre eixos; e desbalanceamentos longitudinais entre truques.

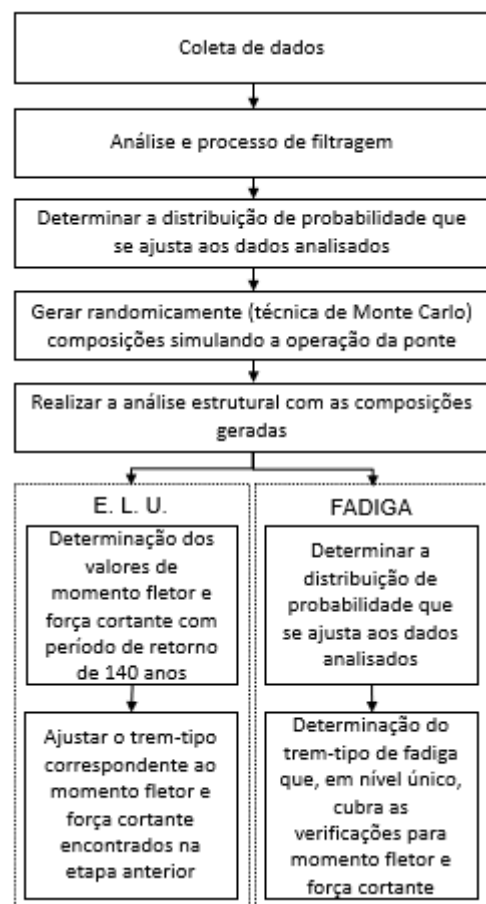


Fig. 2 Etapas da metodologia

3.1 Análise e Processo de Filtragem

Cada concessionária tem um padrão para medir o peso dos eixos dos vagões. Assim, foi necessário entender e colocar em um só padrão para começar o processo de filtragem dos dados.

Mesmo com todo cuidado que as concessionárias têm com o sistema de pesagem, algumas inconsistências podem

aparecer nos dados como: vagão com somente três eixos e peso de vagão muito menor que o peso próprio do vagão são alguns exemplos. Os critérios de filtragem foram definidos considerando as características particulares dos vagões e podem variar de acordo com a necessidade de análise.

A lista a seguir apresenta os filtros que se aplicam aos dados recebidos das concessionárias. Os filtros foram definidos após conversas com os transportadores ferroviários e fabricantes dos vagões. Os dados que se encaixam em qualquer um dos filtros foram excluídos.

- (i) Diferença do peso bruto máximo fornecido pelo fabricante e soma dos pesos dos 4 eixos igual ou superior a 30%;
- (ii) Diferença da tara nominal do vagão fornecida pelo fabricante e soma dos pesos dos 4 eixos igual ou inferior a 10%;
- (iii) Vagão com o número de eixos menor que 4;
- (iv) Peso de um eixo maior que 50tf;
- (v) Peso de um eixo menor que 1tf.

3.2 Determinar os Parâmetros Estatísticos e Distribuição de Probabilidade que Melhor se Ajusta aos Dados Filtrados

As distribuições de probabilidade são muito úteis em modelagem e problemas que exijam uma inferência a partir de uma amostra coletada. Os dados coletados são contínuos e os mesmos podem ser descritos por uma função de distribuição de probabilidade para variáveis aleatórias contínuas como: distribuição normal, log-normal, gama, gumbel, weibull, exponencial, beta, qui-quadrado e entre outras.

3.3 Realizar a Análise Estrutural com as Composições Geradas

Para obter os esforços solicitantes internos gerados na passagem da composição foi utilizado a técnica da linha de influência.

Uma linha de influência registra a variação de um determinado esforço, deslocamento ou reação em função da posição de uma força unitária que percorre a estrutura. Utilizando a linha de influência gerada para uma ponte conseguimos obter o efeito que a posição da carga gera na viga analisada, conforme

apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

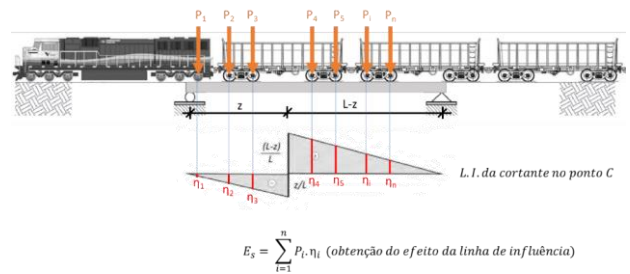


Fig. 3 E.L.U – Determinação dos valores de Momento Fletor (M) e Força Cortante (V) com o período médio de retorno de 140 anos

O valor de período médio de retorno de 140 anos é adotado a partir do que é preconizado na norma NBR 8681 que diz, “os valores característicos devem corresponder a valores que têm de 25% a 35% de probabilidade de serem ultrapassados no sentido desfavorável, durante um período de 50 anos”. [1]

Se considerarmos o valor de 30% de probabilidade (p) de ser ultrapassado durante um período de 50 anos (n), que corresponde ao período médio de retorno (T) de 140 anos, a probabilidade convertida para anual fica:

$$T = \frac{1}{1 - \sqrt[n]{1 - p}} = 140 \text{ anos} \quad (4)$$

$$p_{\text{anual}} = \frac{n}{T} = \frac{1}{140} = 0,7\% \quad (5)$$

Depois de determinado o máximo Momento Fletor (M) e máxima Força Cortante (V) para cada ano simulado e para cada um dos vãos estudados, foi obtido um novo histograma e ajustado para uma distribuição de máximo do tipo Gumbel, conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Com a distribuição de Gumbel ajustada para o histograma obtido, obteve-se o valor S do esforço solicitante com o período de retorno de 140 anos, isto é, probabilidade de excedência do valor S de aproximadamente 0,7%, conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

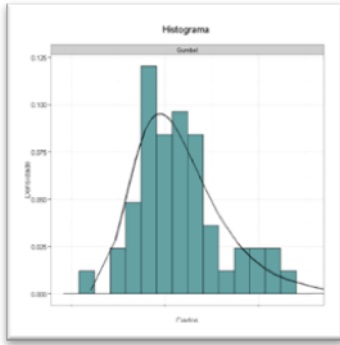


Fig. 4 Novo histograma com os máximos valores anuais

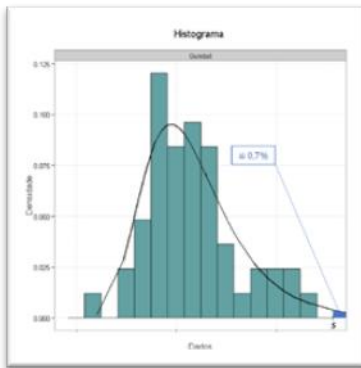


Fig. 5 Obtenção dos esforços solicitantes

3.4 E.L.U. – Ajustar o Trem-Tipo da Norma Correspondente ao Momento Fletor (m) e Força Cortante (V) Encontradas na Etapa Anterior

Trem tipo ferroviário trata de um trem tipo com cargas pontuais (Q) e cargas distribuídas variáveis como os vagões carregados (q) e descarregados (q'). Nesta etapa as cargas Q, q e q' serão multiplicadas pelos fatores α_1 , α_2 e α_3 , respectivamente, para obter o mesmo valor do esforço solicitante ($E_s = S$) para o período de retorno de 140 anos, conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

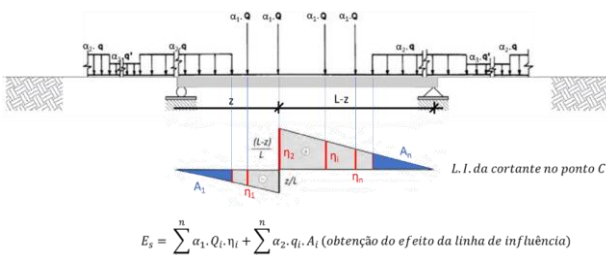


Fig. 6 Ajuste do trem-tipo para atender ao esforço solicitante de 140 anos de período de retorno

3.5 Aplicação da Regra de Palmgren-Miner para as Flutuações de Tensão

A hipótese de Palmgren-Miner é que existe uma relação linear entre a fração de dano (D_i) e o número de ciclos do bloco i de tensões cíclicas (n_i) que é definida por:

$$D_i = \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (6)$$

Onde N_i é a vida em fadiga considerando que a amplitude do bloco de tensão σ_{ai} é constante. O conceito de fração de dano (D_i) só é possível se for assumido que $n_i < N_i$, isto é, que não há ruptura por fadiga para cada bloco individualmente.

O dano acumulado total e a definição do evento de ruptura podem ser escritos por:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}} = 1 \quad (7)$$

3.6 Determinação do Trem-Tipo de Fadiga que, em Nível Único, Cubra as Verificações para Momento Fletor (F) e Força Cortante (V)

Apesar de o fenômeno de fadiga ser efeito de solicitações repetitivas, o cálculo das variações das tensões na armadura, pela norma, é feito considerando-se uma única combinação, obtida no estado limite de serviço, conforme a equação a seguir.

$$F_{ser} = \sum F_{gik} + \Psi_1 \cdot F_{qik} \rightarrow \begin{cases} \sigma_{MÁX} \\ \sigma_{MIN} \end{cases} \quad (8)$$

O ajuste será feito através do Ψ_1 para que o único nível corresponda o histórico de carregamentos e atenda o que preconiza a norma, conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**



Fig. 7 Histórico de carregamentos transformado em nível único

4. RESULTADOS

O resultado do trem tipo para o estado limite último é obtido através do valor que possui probabilidade excedência anual igual a 0,7%.

Este valor apresenta bons resultados e está aderente com as práticas internacionais.

Na análise da fadiga, os resultados obtidos são expressos em termos de probabilidades de falha e seus correspondentes índices de confiabilidade para uma melhor visualização do comportamento dos parâmetros de interesse avaliados. A avaliação da confiabilidade do trem tipo seguiu as prescrições normativas da NBR 8681 e de recomendações internacionais.

Com os dados recebidos nota-se que a variabilidade do peso dos vagões de minério é baixa, o valor coeficiente de variação está abaixo de 5%, e resulta em valores menores de probabilidade de falha. A forma de carregamento e controle do peso dos vagões tem uma grande influência na variabilidade e média.

5. CONCLUSÃO

A criação do critério no processo de filtragem mostrou-se uma importante etapa para evitar qualquer desvio na resposta que pode acabar prejudicando a análise e conclusão dos resultados.

A separação do tipo de produto que cada vagão transporta é muito importante porque influi diretamente na variabilidade da variável aleatória, isto é, se o estudo utilizar os dados de pesagens de vagões de soja e vagões de minério a variabilidade do peso do vagão é muito maior que a variabilidade do peso do vagão que transporta só minério. A determinação correta da variabilidade é a peça chave para que o trem tipo obtido seja econômico e seguro.

E, por fim, é importante ressaltar que o desenvolvimento dos estudos e a consequente elaboração da proposta da nova norma de “Cargas móveis para o projeto de obras ferroviárias” é imprescindível para a definição dos trens-tipos ferroviários brasileiros que representam a carga móvel a ser considerado nos projetos estruturais de construção de novas obras e verificação de obras existentes. Sua importância é, não somente técnica, mas também possibilitar a aplicação de estratégias de integração da malha ferroviária brasileira, permitindo o maior desenvolvimento desse modo de transporte.

8. REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro. 2003.
- [2] ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS – ANTF. Informações gerais – O setor ferroviário de carga brasileiro. <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>, acessado em 07/4/2021 às 21:58.
- [3] FALCÃO, V. A. Importância do transporte ferroviário de carga para a economia brasileira e suas reais perspectivas de crescimento. Revista de Engenharia Civil – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, n. 45, p. 41-63, 2013.
- [4] JUNQUEIRA, J. F. A. Proposta de procedimento para identificação estrutural de pontes e viadutos ferroviários. Dissertação (Mestrado). P. 185. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 2019.
- [5] JUNQUEIRA, J. F. A. REIS, C. DONATO, M. ARAGÃO FILHO, L. A. C. M. SILVEIRA LOPES, L. A. Impactos operacionais da estricção de velocidade em pontes ferroviárias. XI Congresso de Construção Metálica e Mista. P. 521-530. Coimbra, Portugal?? Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, 2017.
- [6] JUNQUEIRA, J. F. A. ARAGÃO FILHO, L. A. C. M. LOPES, L. A. S. RODRIGUES, J. F. Procedimento para avaliação teórica e experimental de pontes ferroviárias. Revista da Estrutura de Aço, v. 9, p. 81-100, 2020.
- [7] MARQUES, F. CINHA, A. FERNANDES, A. CAETANO, E. MAGALHÃES, F. Evaluation of dynamic effects and fatigue assessment of a metallic railway bridge. Structure and Infrastructure Engineering, 635-646, 2010.
- [8] NOWAK, A. S.; COLLINS, K. R. Reliability of Structures. New York: Crc Press, 2013. 407 p.
- [9] TOUNY, S. Y. EI. FATIGUE RELIABILITY OF AASHTO GIRDERS. 2014. 293 f. Tese (Doutorado) – Curso de Civil Engineering, University Of Nebraska, Lincoln, Nebraska, 2014.