



Análise de Risco para Priorização de Pontes Ferroviárias e Estimativa de Vida Útil Focada em Fadiga.

Rodolfo Montoya¹, Marcelo Botelli², João Junqueira³, Felipe Masini⁴

¹ Consultor / Montoya Alves Engenharia / Engenharia / montoyaeng@gmail.com

^{2,3} Especialistas Ferroviários / MRS / Engenharia / marcelo.botelli@mrs.com.br, joão.junqueira@mrs.com.br

⁴ Gerente de Engenharia / MRS / Engenharia / felipe.masini@mrs.com.br

Resumo

As organizações de todos os tipos e tamanhos enfrentam influências e fatores internos e externos que tornam incerto se atingirão seus objetivos. O efeito que essa incerteza tem sobre os objetivos da organização é chamado de “risco”, definido como consequência versus probabilidade de acontecer à mesma. Para garantir a segurança operacional, todos estes itens precisam ser íntegros estruturalmente. Os planos de manutenção para cada um dos ativos mencionados acima, devem seguir a estratégia de manutenção conforme seu risco. Cada ferrovia possui um risco e estratégia de manutenção definida conforme suas características próprias. A criticidade é um atributo do equipamento associado à consequência de uma eventual falha, de forma que quanto maior a consequência da falha do equipamento maior a criticidade deste. Assim, a criticidade é a consequência para nossa cadeia produtiva se o equipamento deixar de funcionar. A criticidade será avaliada em função de características da estrutura, obtidas do cadastro básico da mesma. Para avaliar a probabilidade, avaliamos o dano existente da estrutura, assim utilizamos enquetes técnicas, que foram avaliadas com técnicas de Lógica Difusa. A Lógica Difusa permite utilizar informações com variáveis linguísticas. Assim o técnico pode responder a diferentes níveis de danos em diferentes elementos estruturais. Cada elemento terá uma importância imposta pela matriz. Posteriormente avaliamos uma estimativa de dano à fadiga utilizando técnicas de capacidade dinâmica, registros históricos de operação, velocidade, ciclos de fadiga na operação, serviabilidade, baseados na norma AREMA. Com a multiplicação de ambos os fatores calculamos o Índice de Risco, permitindo priorizar nosso atendimento de manutenção preventiva e corretiva quando necessário. Finalmente obtemos uma ferramenta simples para priorização de milhares de pontes em função do risco, podendo ter uma tomada de decisão fundamental para nossos líderes técnicos.

Palavras-Chaves

Pontes Ferroviárias; Análise de Risco; Priorização; Fadiga; Lógica Difusa.

Introdução

Conhecer e adaptar uma técnica de priorização utilizando análise de risco focada em fadiga (probabilidade) em função da importância dos elementos na parada do processo como um todo (consequência) e a probabilidade de dano desta parada inesperada, é de grande importância no cenário atual de redução de custos. Técnicas de identificação do dano à fadiga, técnicas de interpretação de opiniões técnicas (Lógica Difusa), são utilizadas para quantificar o dano e a probabilidade de colapso, podendo priorizar orçamentos de uma maneira eficiente e qualitativa, adaptando a metodologia para a realidade e a problemas encontrados no sistema de transportes próprio e específico. A técnica também permite estimar a vida remanescente da estrutura utilizando a Norma AREMA.

Histórico Técnico

Existem muitos casos de colapsos de pontes estudados por peritos no mundo inteiro, onde as causas geralmente foram:

- Fadiga produzida pelo trânsito excessivo;
- Falta de investimento e desvios no carregamento ou má utilização dos carregamentos;
- Falta de controle de qualidade na execução;
- Falta de capacitação técnica na equipe de inspeção;
- Falha por motivos de desastres naturais (terremotos, inundações etc.);
- Corrosão excessiva;
- Outros.

Um caso muito conhecido foi o colapso da ponte I-35W Mississippi. A causa primária do colapso foi haver placas de reforço com espessuras menores que o especificado no projeto (BRANCO, 2013).

Contribuindo com o erro, foi o fato de que 2 polegadas (51 mm) de concreto foram adicionadas à superfície da estrada ao longo dos anos, para alcançar o nível necessário do projeto, aumentando a carga morta em 20%.



Figura 1 - Colapso da Ponte I-35W, Mississippi

A equipe responsável por avaliar o colapso, determinou que a corrosão não foi um fator significativo, mas os inspetores não realizavam rotineiramente a verificação de segurança.

Observamos que existe uma combinação de fatores que levam a um acontecimento deste tipo. Todos esses casos representam uma grande preocupação para as concessionárias ou donos do ativo. Mitigar completamente o risco representa um grande investimento em todas as etapas da vida estrutural do ativo. Entretanto precisamos investir, mas a pergunta é quanto, quando e onde?

Análise de Risco Simplificado

Cada ferrovia possui um risco e estratégia de manutenção definida conforme suas características próprias. A priorização será definida em função do risco que o equipamento causa quando para de funcionar na cadeia produtiva. Isto será denominado como Risco para Priorização, definido na Eq. 1:

$$\text{Risco} = \text{Consequência} \bullet \text{Probabilidade} \quad (1)$$

Consequência (Criticidade)

A criticidade é um atributo do equipamento associado à consequência de uma eventual falha, de forma que quanto maior a consequência da falha do equipamento maior a criticidade deste (MONTROYA, 2011). A criticidade será interpretada como a consequência gerada quando esse equipamento para de funcionar no sistema. Sempre devem ser normalizadas as informações e cada característica terá um peso colocado em função da importância combinada e acordada pelos técnicos que conhecem a ferrovia ou sistema de transporte. A somatória de todos os pesos versus as características será o valor da criticidade como mostrado na Eq. 2.

$$C_n = \left(\sum N_n \times \text{Peso} \right) \quad (2)$$

Os Pesos são valores de 0 até 1, e validados em função da importância de cada item para a ferrovia. As características técnicas são tipicamente de projeto ou condições inerentes ao projeto. Apresentamos algumas, para entendimento do raciocínio, (JUNQUEIRA e BOTELLI, 2015).



Figura 2 - Características Técnicas do Ativo

Probabilidade (Dano Estrutural - Opinião Técnica)

As informações dos técnicos que vivenciaram a ferrovia e o desenvolvimento dos danos das pontes são valiosas, assim as mesmas devem ser consideradas na priorização.

Utilizamos enquetes técnicas, que serão avaliadas utilizando técnicas introdutórias de Lógica Difusa, realizando as seguintes perguntas qualitativas obtidas das inspeções visuais:

- Dano - via permanente e superestrutura;
- Dano - transições e encontros;
- Dano - aparelhos de apoio;
- Danos - estacas e blocos de fundação.

Serão utilizadas variáveis linguísticas obtidas da experiência pratica das inspeções visuais ao longo do tempo (CRISTANCHO, 2013).

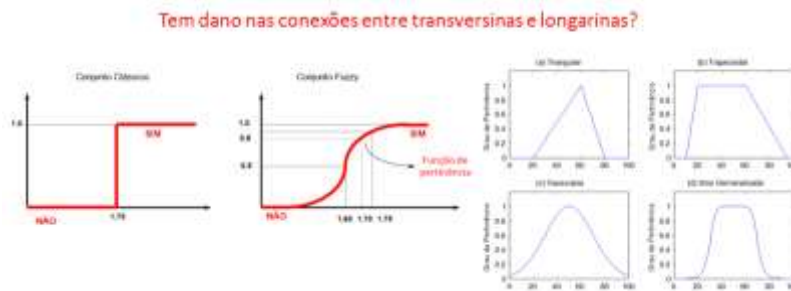


Figura 3 - Lógica Difusa

Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou é completamente verdadeira ou é completamente falsa. Entretanto, na Lógica Difusa, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

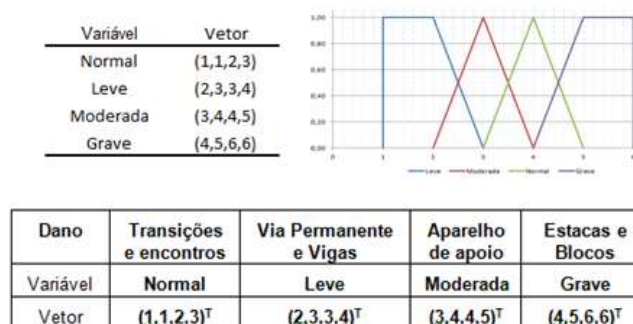


Figura 4 - Variáveis Linguísticas Utilizadas

Para avaliar o dano utilizamos as seguintes variáveis: Normal, leve, Moderada e Grave.

Sempre devem ser normalizadas as informações. Como a consequência, a probabilidade terá um valor, que neste caso será um vetor de opinião “Av” e um peso que será um vetor de importância para cada elemento estrutural “CAg” (Eq. 3).

$$Pr = [Av] \otimes [CAg] \quad (3)$$

Probabilidade (Dano estrutural focado na fadiga)

A concentração de tensões é definida como um aumento das tensões devido a uma mudança na geometria ou descontinuidades. Fissuras por fadiga iniciam-se nesses locais. A fadiga em pontes de aço inicia-se em detalhes mal projetados e/ou executados. Métodos de reforço para aumentar a capacidade de carga podem ter consequências desastrosas se a fadiga não é corretamente analisada (AREMA, 2013).



Figura 5 - Elementos com alta concentração de tensões

A técnica apresentada a seguir, vai determinar um índice de fadiga que permite estimar a vida remanescente e o nível de fadiga que a estrutura está sofrendo pelos ciclos de carregamento, permitindo a priorização.

Estimativa de Vida Útil à Fadiga e Determinação do Índice a Fadiga

A proposta esta baseada na norma AREMA, os modelos utilizados e a análise em elementos finitos foi utilizando um programa desenvolvido pelo primeiro autor, denominado **CarTool Fadiga** (MONTROYA, 2009). No mesmo podem ser estudados todos os efeitos dinâmicos e fadiga utilizando elementos finitos.

Modelo utilizando Análise Matricial e/ou Elementos Finitos

Foram desenvolvidos programas capazes de calcular elementos de barras, pórticos e de área, para avaliar as diferentes configurações estruturais dos elementos e conexões. Esse módulo do programa **CarTool** (MONTROYA, 2009) permite a avaliação dinâmica e registro do histórico no tempo, obtendo deformações e tensões para qualquer tipo de seção em qualquer ponto, assim como distâncias entre eixos das locomotivas e vagões e carga por eixo, e distribuição das cargas nas vigas.

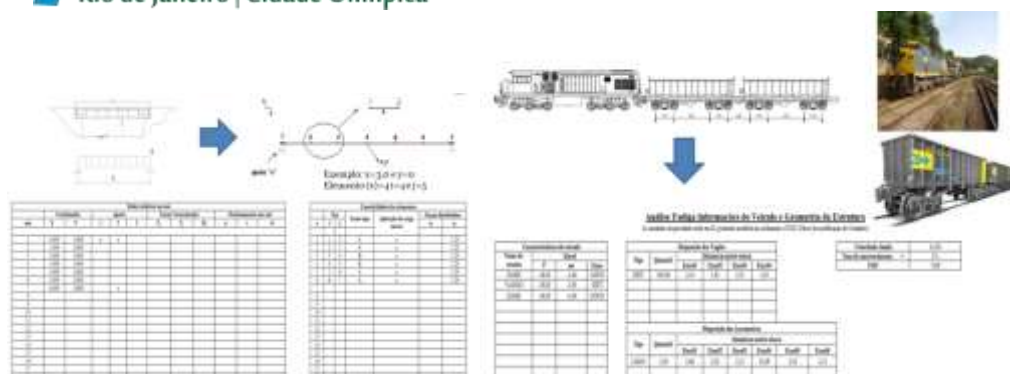


Figura 6 - Modelo Estrutural de uma Ponte utilizando elementos finitos e características dos veículos

Contagem de ciclos utilizando *RainFlow*

A passagem das composições sobre uma determinada ponte provoca variações de tensão nos diversos elementos estruturais que podem ser representadas através de diagramas tensão em função do tempo ($\sigma-t$). Com base nestes diagramas é possível, através de métodos de contagem *rainflow*, obterem-se o número de ciclos de tensões a que o elemento é submetido em correspondência com determinadas classes de amplitude de tensão.

Como resultado desta contagem, é possível obter um histograma de frequências da amplitude de tensão também designado por espectro de tensões ou de amplitudes de tensão, e que constituem a base para a análise da fadiga (AFONSO, 2007). As amplitudes de tensão são definidas como a diferença entre um máximo local e um mínimo local da tensão, pela Eq. 5.

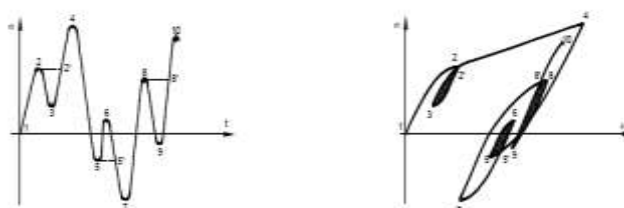


Figura 7 - Ciclos de contagem Rainflow

Critério cumulativo de Palmgren-Miner

Palmgren e Miner assumiram a possibilidade de acumulação linear do dano relativo a cada uma das classes de amplitude de tensão. O comportamento não linear na acumulação do dano relaciona-se com o fato de classes de amplitude de tensões distintas apresentarem pesos distintos na avaliação do dano (AFONSO, 2007).

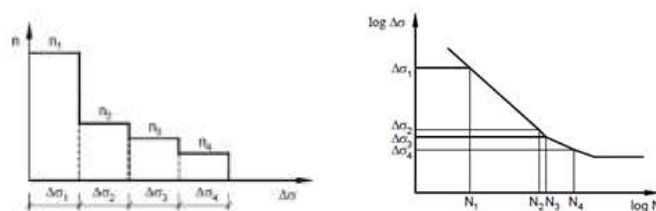


Figura 8 - Regras de acúmulo de dano


$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

Por conseguinte, o dano referente a ciclos de pequena amplitude de tensão é distinto do dano associado a ciclos de grande amplitude de tensão, em virtude das primeiras serem responsáveis pela iniciação das fendas, enquanto as segundas estão ligadas ao seu desenvolvimento. A facilidade de aplicação da regra de Miner, e os bons resultados por ela obtidos quando comparados com resultados de ensaios experimentais, levaram a que a hipótese de acumulação linear do dano seja aceita (AFONSO, 2007). O critério de ruptura quando se recorre ao método de acumulação de danos é: quando D é superior de 1,0 existe fissura (Eq. 4), quando inferior pode ser calculado quantos anos faltam para sua ocorrência. Este índice também será utilizado como priorização: quando for menor que 1, será uma maneira de priorizar o dano na estrutura para diferentes pontes. Assim como pode ser estimada a vida remanescente à fadiga.

Modelo de interpretação de Danos AREMA

Avaliação pelo Método da AREMA utilizando algumas variações propostas (AREMA, 2013):

- Avaliação Dinâmica do local onde existe a possibilidade de ruptura a fadiga. Utilizamos as dimensões reais dos veículos, carregamentos reais e quantidades de trens em operação desde a construção da ponte;
- É avaliada para diferentes tempos a passagem de cada eixo e é guardado um registro de tensões ao longo do tempo;
- São avaliadas as diferenças de tensões no registro e utilizado a contagem de ciclos *rainflow*, podendo se parametrizar em frequências de tensões pela Eq. 5;
- Escolhemos o tipo de detalhe segundo a AREMA para obter os coeficientes A e S_r . Os mesmos permitem calcular o número de ciclos para esse nível de tensão, utilizando a Figura 12.



Categoria	Constante A
A	$2,5 \times 10^{10}$
B	$1,2 \times 10^{10}$
B'	$6,1 \times 10^9$
C	$4,4 \times 10^9$
D	$2,2 \times 10^9$
E	$1,1 \times 10^9$
E'	$3,9 \times 10^8$

Figura 9 - Conexões e valores da constante A, segundo a AREMA

- Calculamos o “ S_{RE} ” pelas Eq. 6 e 7, que é a faixa de tensão aplicada melhor correlacionada com a regra de Miner, onde n_i é o numero de ciclos para uma faixa de tensões S_{ri} , atuante do meu registro de tensões;

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (5)$$

(6)

$$S_{RE} = \alpha \left(\frac{\sum n_i S_{R_i}^3}{\sum n_i N} \right)^{1/3}, \alpha = 1 \quad (7)$$

$$A = \frac{S_R^{-3}}{S_{RE}^{-3}}$$

- Calculamos o dano acumulado utilizando o critério cumulativo de Palmgren-Miner (Eq. 8 e Eq. 9)

$$D_d = \sum \frac{N_{\text{rainflow}}}{A} \cdot \frac{S_{RE}}{S_{RFRAT}} \quad (8)$$

$$D_d \leq 1, \text{ onde } D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (9)$$

Onde, “ N_{ciclos} ” é o numero de ciclos para alcançar o “ S_{frat} ” das tabelas da AREMA e “ n_i ”, são os ciclos que obtive da contagem de ciclos.

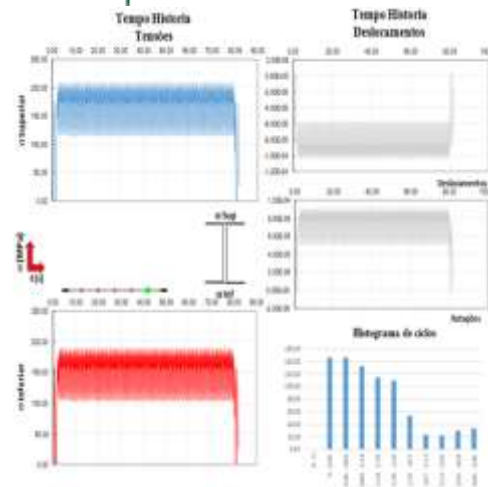


Figura 10 - Registros de tensões e histograma de ciclos de carregamento

O índice “ D_d ” será nossa priorização para nosso sistema. Para estimar a vida útil (EVU) devemos utilizar as Eq. 10. e 11.

$$AS = \text{Ano Atual} - \text{Ano construção} \quad (10)$$

$$EVU = \frac{1 - D_d}{D_d} \cdot AS \quad \text{Ou} \quad VR = \frac{\sum_i n_i}{\sum_i \frac{n_i}{N_i}} \quad (11)$$

Priorização utilizando análise de Risco focada em Fadiga

A priorização será definida em função do risco que o equipamento causa, quando para de funcionar na cadeia produtiva, sendo definido o mesmo pela Eq.12:

$$A = \% \text{Importância} \quad B = \% \text{Importância} \quad \text{Risco} = (\sum N_n \cdot \text{Peso}) \cdot (A \cdot \text{Dano Opinião} + B \cdot \text{Dano Fadiga}) \quad (12)$$

Os percentuais devem ser acordados entre os técnicos da ferrovia em função da confiabilidade da ferramenta. Por exemplo, quando recém implantada, a opinião técnica é mais importante que a numérica, ou seja, o percentual **A** é maior que o **B**.

Frequências de Inspeções e Manutenções

As frequências de inspeções vão depender muito da experiência e vivência dos técnicos responsáveis. Para isto foi recomendado se realizar uma breve pesquisa nas diferentes normas de ferrovias. Assim temos as principais considerações de frequências:

- Para normas americanas ARMY TM 5-600 e AIR FORCE AFJPAM 32-1088, as pontes deverão ser inspecionadas visualmente cada dois anos e detalhadamente a cada três anos;



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

- Para a Norma DNIT é recomendada uma frequência para as inspeções visuais de cada dois anos, com inspeção detalhada cada cinco anos;
- Para o EUROCODE é recomendada uma frequência de inspeção detalhada a cada seis meses para pontes que ultrapassaram a vida útil a fadiga;
- Para a AREMA é recomendada uma frequência para as inspeções visuais a cada um ano para estruturas metálicas e as demais estruturas serão definidas pelo especialista da ferrovia;
- Para a NBR 9452 é recomendada uma frequência de inspeção visual não superior de 1 um ano e as inspeções detalhadas dependem da avaliação visual.

Cada ferrovia terá que decidir as frequências que mais atendem ao cenário, condições e interesses sócio-econômicos.

Conclusões

Utilizando as técnicas de priorização consegue-se uma gestão mais efetiva dos ativos de uma ferrovia, minimizando os riscos e planejando adequadamente os recursos.

Referências

- AFONSO D., Verificação à Fadiga de Pontes Metálicas Ferroviárias, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2007.
- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION (AREMA), - Manual for Railway Engineering, AREMA - 2013.
- BRANCO H., Colapso de Pontes Lições Aprendidas. Trabalho Final de Mestrado. Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2013.
- CRISTANCHO, D., Sistemas de Inferência Difusa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- EUROCODE, European Standards, EN - 1990.
- JUNQUEIRA, J., BOTELLI, M. *et al.*, Procedimento de Infraestrutura da MRS., ET - Publicação corporativa, MRS Logística, 2015.
- MONTOYA R. C. *et al.*, Manual de Infraestrutura da Vale, Publicação corporativa EFVM e EFC. VALER, 2011.
- MONTOYA, R. C., Programa CarTool Fadiga, Montoya Alves Engenharia, 2009.
- NORMA DNIT 010/2004, PRO – DNIT, Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido. Normas e Manuais internos. DNIT - 2004.
- NBR 9452:2012, Procedimento para as vistorias de pontes e viadutos de concreto, Normas Brasileiras. ABNT, 2012.
- TECHNICAL MANUAL, BRIDGE INSPECTION, MAINTENANCE AND REPAIR, AFJPAM 32-1088. U.S. ARMY, 1994.