

# MÉTODO ESTATÍSTICO DE PREVISÃO DE COLAPSO DE TRILHO FERROVIÁRIO POR FADIGA

*Paulo Lobato*<sup>1</sup>; *Isadora Berg*<sup>2</sup>

## RESUMO

O trilho ferroviário é um dos componentes mais caros do orçamento de manutenção de via permanente ferroviária. O conhecimento do seu mecanismo de degradação e da sua vida útil é essencial para aquelas ferrovias que buscam reduzir os custos financeiros relacionados à imobilização de capital e os seus custos operacionais, pois permite reduzir a necessidade de grandes estoques de trilho, selecionar melhor os trilhos, priorizar melhor a aplicação nos locais que realmente precisam e planejar melhor os grandes serviços de renovação de via. Tendo em mãos alguns dados históricos levantados em campo, é possível elaborar modelos estatísticos que permitem prever a taxa de degradação dos trilhos ferroviários tanto em função do seu desgaste, quanto em função da sua fadiga superficial e da sua fadiga interna. Em paralelo, este estudo permite também avaliar qual o mecanismo de degradação para determinadas condições de conservação e geometria de via, volume de tráfego, entre outros. Neste sentido, este artigo tem por objetivo apresentar de forma geral as formas de degradação de trilho e, em mais detalhe, um método estatístico de previsão de colapso do trilho por fadiga.

**PALAVRAS-CHAVE:** fadiga, trilho, superestrutura, ferrovia.

## ABSTRACT

The rail is one of the most expensive components of the maintenance budget for railroad permanent way. Knowledge of its degradation mechanism and useful life is essential for those railways that seek to reduce the financial costs related to capital immobilisation and its operating costs by reducing the need for large rail stocks, better selecting rails, better prioritizing the application in the places that really need and better planning the great services of track renovation. Having in hand some historical data collected in the field, it is possible to elaborate statistical models that allow you to predict the rate of degradation of rails both due to their wear, as well as due to their superficial fatigue and their internal fatigue. In parallel, this study also allows you to evaluate the mechanism of degradation for certain track conservation conditions, its geometry, its traffic volume, among others. In this sense, this article aims to present in general the forms of rail degradation and, in more detail, a statistical method of predicting fatigue rail collapse.

**KEY WORDS:** fatigue, rail, superstructure, railway.

---

<sup>1,2</sup> Afiliação: BRFERROVIA, Rua Geraldo Faria de Souza 469, Belo Horizonte, Minas Gerais. [brferrovia@brferrovia.com.br](mailto:brferrovia@brferrovia.com.br)

# 1 INTRODUÇÃO

O trilho é um componente estrutural da via permanente. Sua função é guiar as composições ferroviárias e distribuir a carga de seus veículos para as camadas inferiores da plataforma ferroviária. Na dinâmica de contato roda-trilho, o trilho está sujeito a uma combinação de esforços verticais, laterais e longitudinais. Estes esforços levam o trilho à sua degradação, que geralmente é descrita na literatura através de dois fenômenos: desgaste e fadiga.

O desgaste dos trilhos é motivado pelo atrito da roda contra o trilho que, por sua vez, acaba por se desgastar pelo fato de ser, geralmente, constituído de um material menos duro que a roda.

A fadiga é um dano estrutural progressivo em um material, gerado por ciclos repetidos de carregamento. A fadiga mecânica, que será o foco deste artigo, pode ser descrita como o dano induzido pela aplicação flutuante de esforços e deformações [10].

Já a fadiga de contato é um fenômeno que ocorre devido ao acúmulo de tensões nas camadas superficiais do trilho que acaba por fragiliza-las sem desgastá-las. Assim, com o acúmulo de ciclos de carregamento, pequenas fissuras surgem na face do trilho que, se não forem eliminadas, podem evoluir até causar a ruptura total do trilho.

Uma vez que o trilho é geralmente o componente que consome a maior parte do orçamento de manutenção de via permanente, a gestão da manutenção deste componente tem sido nos últimos anos objeto de vários estudos buscando otimizar a sua utilização e prolongar a sua vida útil. Neste sentido, a compreensão dos fenômenos que mais comumente levam à sua degradação: desgaste ou fadiga; é um dos aspectos mais importantes para a tomada de decisão em relação às estratégias de manutenção a serem adotadas com a finalidade de reduzir estoques e custos de aquisição de trilho.

Neste sentido, o objetivo deste artigo é apresentar um método estatístico capaz de prever a vida útil de um trilho por fadiga, em função dos defeitos superficiais e internos. Para tanto, na primeira seção é apresentado de forma geral as formas de degradação do trilho por desgaste e por fadiga. Em seguida é apresentado um método estatístico de previsão de colapso do trilho por fadiga.

## 2 FORMAS DE DEGRADAÇÃO DO TRILHO

### 2.1 *Desgaste do trilho*

O desgaste do trilho ocorre devido à interação da roda com o trilho e é dominante em curvas, onde ocorrem os máximos cisalhamentos roda-trilho. Além disso, os deslizamentos relativos entre a roda e o trilho e o desenvolvimento de tensões entre os pontos de contato têm forte contribuição na aceleração do desgaste [3].

O controle do desgaste de trilho é importante pois a resistência à flexão do trilho está diretamente relacionada à sua área transversal útil, como pode ser deduzido da equação abaixo:

$$\sigma = M/W \leq \sigma_{adm}$$

Sendo:

$\sigma$ : Tensão atuante

M: Momento fletor

W: Módulo de resistência à flexão

$\sigma_{adm}$ : Tensão admissível

Cada ferrovia possui limites e formas de controle específicos no que se refere ao limite de desgaste de trilho. No entanto, geralmente, o limite de desgaste é função da perda de área ou dos desgastes lateral e vertical do boleto, conforme figura abaixo.



Figura 1 - Padrão de desgaste de trilho [7]

A Resolução nº 2748 de 12/06/2008 / ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres, que dispõe sobre os procedimentos a serem adotados pelas Concessionárias de Serviços Públicos de Transporte Ferroviário de Cargas, define o limite de desgaste de trilho para trechos com circulação de produtos perigosos:

“Os trilhos não podem apresentar desgastes superiores a 25% da área do boleto, exceto quando o módulo de resistência permitir. No caso de trilhos esmerilhados por método científico, serão permitidos desgastes de até, no máximo, 55% da área do boleto.”

De acordo com Zarembski, a vida útil do trilho, no que se refere ao desgaste, é função de uma complexa combinação dos seguintes fatores [8]:

- Raio de curva;
- Dureza do trilho;
- Lubrificação;
- Velocidade;
- Perfil do trilho;
- Estratégia de união dos trilhos: junta ou trilho contínuo soldado;
- Volume anual;
- Gradiente da via;
- Carga por eixo.

No entanto, a determinação de uma equação que define a vida útil do trilho em função destes fatores é extremamente complexa e particular de cada ferrovia. Portanto, geralmente na prática é realizado um levantamento histórico do desgaste do trilho a fim de se determinar as taxas de desgaste de segmentos de via com características similares [8].

A fim de se combater o desgaste de trilho, o maior aliado das ferrovias mundiais têm sido a lubrificação fixa ou móvel e a gestão do atrito de topo de trilho. Estas ferramentas são muito eficazes pois reduzem as tensões de contato roda-trilho, reduzindo assim o desgaste, o consumo de combustível e o ruído gerado no contato roda-trilho.

## 2.2 Fadiga do trilho

Em ferrovias heavy-haul, a dinâmica de carregamento dos trilhos ao longo de sua vida útil é bastante intensa. Ela ocorre de forma que a carga no trilho sobe rapidamente de zero para um alto

pico de tensão e retorna a zero logo em seguida, isto de forma repetida e em um curto espaço de tempo, durante a passagem das composições. Trilhos de ferrovias Heavy-Haul caem na categoria de “alto ciclo de fadiga”, que varia entre  $10^6$  a  $10^8$  ciclos de carregamento durante a sua vida útil [10].

Este fenômeno é responsável por catalisar o surgimento de defeitos internos e superficiais nos trilhos que, se não forem tratados, podem evoluir rapidamente para uma fratura total e um possível acidente ferroviário.

Como pode ser observado na figura abaixo, existe uma correlação entre a tensão máxima aplicada ao trilho e o número de ciclos de carregamento. De forma que, quanto menor a tensão aplicada, maior a quantidade de ciclos o trilho suporta antes de atingir a fadiga total.

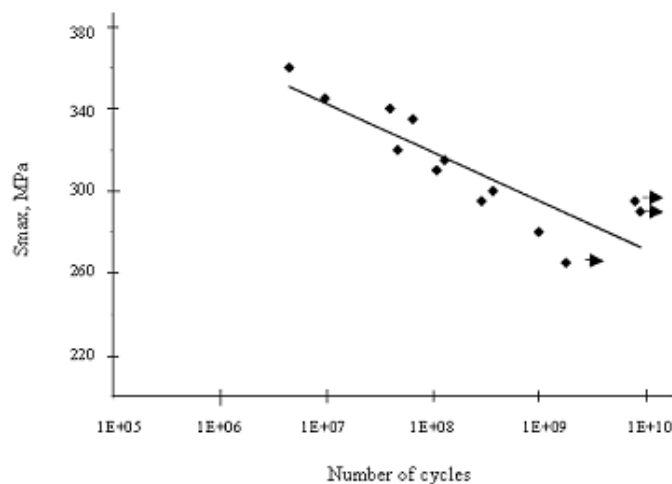


Figura 2 - Curva de tensão máxima x número de ciclos em trilho aço 700 [10]

Neste sentido os trilhos são dimensionados de forma a suportar um alto ciclo repetido de carregamentos para uma determinada tensão de projeto e características da linha.

### 2.2.1. Monitoramento da fadiga

Existem duas formas geralmente utilizadas para avaliar o nível de fadiga dos trilhos. Uma é através do processo de ultrassom que identifica a presença de trincas internas nos trilhos utilizando equipamentos capazes analisar o comportamento de ondas ultrassônicas no interior do trilho. A segunda forma é através da prospecção de defeitos superficiais de trilhos, que pode ser realizada visualmente a pé ou através de método automatizado com câmeras lineares.

As informações provenientes desse tipo de monitoramento são as entradas para a realização do estudo de previsão de vida útil do trilho através do método que será apresentado neste artigo.

### 2.2.2. Defeitos nos trilhos

Conforme explicado anteriormente, podemos classificar os defeitos do trilho por fadiga como superficiais ou internos.

Os defeitos internos geralmente são originários de falhas na fabricação do trilho ou por fim de vida útil devido aos carregamentos sucessivos.

Estes defeitos geralmente necessitam de certas formas de tensão para iniciar sua progressão ou desenvolver um defeito de tamanho detectável. Neste sentido, os principais tipos de tensão são:

- Tensão de contato – ocorre devido ao carregamento do vertical e lateral do trilho proveniente do veículo ferroviário.

- Tensão térmica – ocorre devido à dinâmica de contração e extensão do trilho devido à variação de temperatura do mesmo quando aplicado na linha.
- Tensão residual – é resultado do processo de fabricação.

Os defeitos superficiais por fadiga de contato se desenvolvem devido às tensões provenientes da dinâmica de contato da roda com o trilho. O primeiro estágio deste tipo de defeito é o headchecking, figura 03. Se não for eliminado através do esmerilhamento, estes defeitos evoluem em extensão e profundidade para os chamados: flaking, spalling e shells.



*Figura 3 - Head checking [12]*



*Figura 4 - Shelling [12]*

Outro importante defeito superficial de trilho é o patinado, figura 5. Este, por sua vez é resultado da abrasão devido ao deslizamento da roda sobre o trilho de forma excessiva.



*Figura 5 - Patinado [12]*

Este tipo de defeito potencializa as forças de impacto no trilho que, de tão excessivas podem levar à ruptura repentina total do trilho. Além disso, geralmente impedem a leitura dos defeitos internos do trilho pelos veículos de ultrassom e podem evoluir para o interior do trilho culminando em uma fratura.

### 3 PREVISÃO DE COLAPSO DO TRILHO POR FADIGA

Tradicionalmente há duas formas de se modelar a vida de um componente: o modelo mecanístico e o empírico. O primeiro se trata de modelos matemáticos que buscam simular os mecanismos reais de falha a fim de determinar a degradação ou falha de um componente. Nesta abordagem são definidas as propriedades mecânicas reais dos componentes e seu sistema completo de carregamentos de forma que a interação entre os carregamentos e os materiais possam ser simulados matematicamente para representar os mecanismos de falha. Esta abordagem geralmente é bastante sofisticada e normalmente requer complexos algoritmos computacionais [9].

Os modelos empíricos são baseados em dados experimentais ou de observação para obter a relação entre fatores chave que afetarão a vida dos componentes. Estes modelos são geralmente derivados de abordagens estatísticas, em que grande volume de dados é coletado e correlacionado. Além disso, normalmente são mais simples e tendem a necessitar de menos tempo computacional que o modelo mecanístico. Por outro lado, tendem a ser mais dependentes dos dados coletados [4].

O modelo que será abordado mais em detalhe na sequência deste artigo para previsão de vida útil de trilho por fadiga é um modelo empírico.

#### 3.1. Coleta de dados

Como dito anteriormente, o sucesso deste tipo de abordagem está intimamente ligado à qualidade e quantidade de dados coletados. Os dados coletados devem ser provenientes de inspeções por ultrassom e inspeção de defeitos superficiais do trilho.

Neste sentido, para a realização de um estudo de vida útil de trilho por fadiga, deve ser levantada a base histórica de assentamento de trilhos do trecho e a base de dados de inspeção de ultrassom e de condição de defeitos superficiais de no mínimo 3 anos anteriores à data presente. Assim, a base de dados de ultrassom e de defeitos superficiais deve conter no mínimo os seguintes itens:

- Data da medição
- Local medido
- Identificação se curva ou tangente

- Raio da curva
- Posição do defeito (trilho externo ou interno)
- Tipo de defeito
- Criticidade do defeito
- Extensão do defeito
- Data de aplicação do trilho
- Volume transportado no trilho
- Fabricante do trilho
- Ano de fabricação do trilho

É importante que haja também uma quantidade de dados mínima para análise, por isso, a frequência ideal de coleta de dados de ultrassom é a cada 4 meses. E a frequência ideal de coleta de dados de defeitos superficiais é a cada 6 meses.

Além dessas informações, é interessante conhecer o volume histórico e previsto para o trecho em análise, assim como as características geométricas do trecho a ser estudado.

### 3.2. Segmentação da via

Uma vez coletados todos os dados, os mesmos devem ser tratados de forma a segmentar a via em trechos homogêneos, segundo critérios de segmentação. Na definição dos critérios de segmentação, segundo Zarembski et. al., deve-se considerar os segmentos homogêneos, ou seja, aqueles em que todos os parâmetros-chave de via e tráfego que afetam a vida útil do trilho permanecem constantes ao longo daquele segmento.

É importante reforçar que cada ferrovia ou segmento de ferrovia possui características e estratégias de manutenção únicas, portanto os resultados obtidos a a partir da análise de um trecho, pouco provavelmente poderá ser aproveitado para outro.

Por fim é realizada a análise estatística de previsão de vida útil conforme modelo sugerido a seguir.

### 3.3. Modelo estatístico

A previsão da taxa de falhas de via pode ser estimada através da distribuição de probabilidade de Weibull. Este modelo foi proposto por Waloddi Weibull em aplicações envolvendo questões de engenharia e fadiga de metais. Desde então, esta distribuição de probabilidade tem sido utilizada para analisar dados e prever a taxa de falhas de via, uma vez que a técnica fornece boa análise e previsão de falhas com representativa acurácia. Além disso, a distribuição é frequentemente aplicada sobre dados relacionados ao tempo de vida de componentes mecânicos.

Conforme proposto por Chattopadhyay et. Al (2009), a quantidade de falhas para um MTB acumulado pode ser considerada uma variável aleatória modelada pela distribuição de Weibull. Desta forma, se denotarmos o MTB acumulado como MTB, a distribuição acumulada de falhas de trilho seria:

$$F_n(MTB) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{MTB}{\beta}\right)^\alpha\right)$$

Onde os parâmetros são definidos por:

$\alpha$  = inclinação da curva da distribuição, também conhecido como shape parameter

$\beta$  = intercepto da curva, também conhecido como scale parameter

Como propriedades da distribuição de probabilidade de Weibull podemos definir a taxa de falhas e o tempo médio de vida, respectivamente, por:

$$\text{Taxa}(\text{MTB}) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} \text{MTB}^{(\alpha-1)}$$

$$\text{Vida}(\text{MTB}) = \beta \Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)$$

Em que:

Taxa(MTB) = taxa de falhas por MTB

Vida (MTB) = tempo médio para falha em MTB

$\Gamma$  = função gama

Um exemplo gráfico da taxa de falhas no tempo da distribuição de Weibull é apresentada na figura 6. Da figura pode-se observar que as distribuições que apresentam uma taxa de falha crescente no tempo são aquelas que possuem o valor do shape parameter  $\alpha$  maiores que 1.

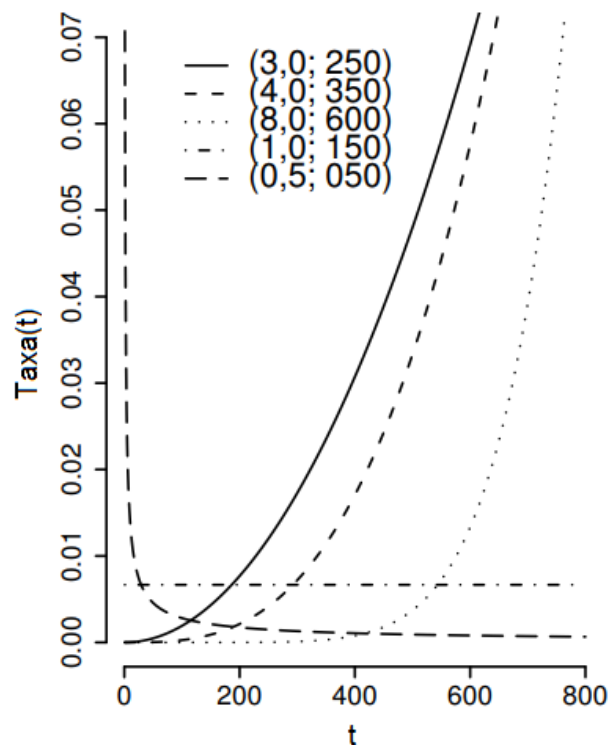


Figura 6 - Exemplo gráfico da taxa de falhas no tempo da distribuição de Weibull

Ao modelar os dados de falhas de via sobre uma distribuição de probabilidade é necessário avaliar a qualidade de ajuste da modelagem. Esta avaliação pode ser realizada recorrendo-se aos gráficos de papéis de probabilidade, a exemplo dos gráficos P-P plot e Q-Q plot, bem como aos testes estatísticos de qualidade de ajuste, a exemplo do teste de Kolmogorov-Smirnov. Desta forma, somente após a confirmação de que a distribuição está bem ajustada aos dados, a técnica de Weibull poderá ser utilizada para a análise e previsão de falhas na via.



## 4 CONCLUSÃO

O conhecimento do mecanismo de degradação e da vida útil do trilho ferroviário é essencial para aquelas ferrovias que buscam reduzir seus custos financeiros relacionados à imobilização de capital e os seus custos operacionais.

Algumas das vantagens relacionadas ao bom gerenciamento da vida útil do trilho e dos seus mecanismos de degradação, podem ser resumidas nos seguintes itens:

- Redução da necessidade de grandes estoques de trilho;
- Melhor priorização da aplicação de trilhos nos locais que realmente precisam;
- Melhor planejamento dos grandes serviços de renovação de via.

Pensando nestas vantagens, este artigo teve por objetivo apresentar de forma geral as formas de degradação de trilho e, em mais detalhe, um método estatístico de previsão de colapso do trilho por fadiga.

Assim, o método apresentado neste artigo define a via útil do trilho em termos de volume acumulado e dos shape parameters obtidos através da aplicação do modelo de distribuição de probabilidade de Weibull.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. COLOSIMO E. A., GIOLO S. R., *Análise de sobrevivência aplicada*. 1ª Edição. Editora Edgard Blücher. 2006.
- [2]. FARMUREWA S.M., ASPLUND M., KUMAR U. Evaluation of rail wear characteristics on heavy haul track section using measurement data. IHHA 2015 Conference Perth 21-24 June. International Heavy Haul Association. 2015.
- [3]. G. CHATTOPADHYAY , S. KUMAR, Parameter Estimation for Rail Degradation Model. International Journal of Performability Engineering Vol. 5, No. 2, January 2009, pp. 119-130.
- [4]. MURRAY M. Rail fatigue and role of impact forces. IHHA 2015 Conference Perth 21-24 June. International Heavy Haul Association. 2015.
- [5]. ROSS S. *A first course e in probability*. Sixth Edition. University of Southern California. 2001.
- [6]. STONE D., LOPRESTI J., MARICH S., ZAHKAROV S., NAUMOV A. Rails, in *Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Infrastructure construction and maintenance issues*. International Heavy Haul Association. 2009.
- [7]. ZAREMBSKI A. M, EUSTON T.L., PALESE J. W. Use of track component prediction models in infrastructure management. AusRAIL PLUS 2005 Sydney 22-24 November. 2005.
- [8]. ZAREMBSKI A.M. Rail life analysis and its use in planning track maintenance. Rail Technology International. 1993.
- [9]. ZAREMBSKI A.M. Maintenance management analysis tools, in *Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Infrastructure construction and maintenance issues*. International Heavy Haul Association. 2009.

- [10]. KAZYMYROVYCH V. Very high cycle fatigue of engineering materials. Karlstad University Studies, Sweden. 2009:22.
- [11]. LOBATO P. et Al. Implantação do processo de esmerilhamento de trilhos na VLI. 22ª Semana de Tecnologia Metroferroviária. 13 – 16 Setembro. AEAMESP. São Paulo. 2016.
- [12]. Rail Defect Manual. Federal Railroad Administration. 2<sup>nd</sup> Revision. July, 2015.