

ANÁLISE DA VIDA REMANESCENTE DE TRILHOS DESGASTADOS EM SERVIÇO ⁽¹⁾

Eduardo Luis Schneider (2)

Afonso Reguly (3)

Marcio Kramer de Macedo (4)

Inácio da Fontoura Limberger (5)

Resumo

O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento de trilhos ferroviários, avaliando parâmetros fundamentais para sua utilização mais segura. Dentre eles, o seu desempenho em fadiga, seu desempenho frente à propagação de trincas e sua tenacidade à fratura. Neste trabalho foram realizados ensaios de qualificação (caracterização mecânica e metalúrgica) de trilhos novos e usados que consistiram em ensaios estáticos de tração, ensaios de dureza, ensaios da mecânica da fratura, K_{IC} e determinação de curvas $da/dN \times \Delta K$. Uma vez determinadas as características mecânico-metalúrgicas dos trilhos, foram analisados o crescimento de defeitos transversais internos através de fórmulas da mecânica da fratura, desenvolvidas por Orringer, que permitem determinar: o tamanho do defeito no qual a falha no trilho pode ser esperada (quando o trem viaja sobre o mesmo), o tempo para que o defeito cresça de um certo tamanho até um tamanho crítico (vida remanescente) no qual a falha é esperada e a influência do desgaste no boleto.

Palavras-chave: Trilhos ferroviários; Mecânica da fratura; Desgaste; Vida remanescente.

¹ *Contribuição ao 60º Congresso Anual da ABM, de 25 a 28 de julho de 2005, em Belo Horizonte, MG.*

² *Engenheiro Metalurgista, Mestrando em Engenharia no PPGEM – UFRGS.*

³ *Engenheiro Metalurgista, Prof. Doutor, Pesquisador no PPGEM – UFRGS.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista, Doutorando no PPGEM – UFRGS.*

⁵ *Engenheiro Metalurgista, Doutor- UFSM*

INTRODUÇÃO

Entre as correntes tendências da indústria ferroviária, estão cada vez mais trens viajando a cada ano e carregando uma carga cada vez maior (o que aumenta o carregamento médio da roda que é experimentado pelo trilho). Uma das conseqüências é a maior ocorrência de defeitos internos e o aumento na taxa de crescimento desses defeitos. Essas conseqüências criam um desafio para as operações nas ferrovias, já que com mais trens viajando nas mesmas, menos tempo resta para a realização das inspeções e reparo de defeitos.

Para minimizar esse problema, uma ação imediata deve ser tomada, uma vez que um defeito no trilho é descoberto. A ação pode ser uma redução na velocidade do trem, um reparo temporário, ou a substituição do trilho que contenha o defeito. Para facilitar reparos e substituições nos trilhos, os técnicos seguem o carro detector, na medida que esse vai inspecionando a ferrovia. Entretanto, a distância que o carro detector pode inspecionar nas ferrovias é confinado por um número de reparos que conseguem ser feitos em um dia. Uma estratégia alternativa para lidar com defeitos detectados é permitir defeitos com tamanho específico a permanecerem em serviço por um certo período de tempo antes que ocorra uma intervenção. Em princípio, o benefício dessa proposta estratégica, seria um aumento no número médio de trilhos inspecionados por dia pelo carro detector, que poderá inspecionar mais defeitos, já que muitos desses, seriam considerados como eminentes causadores de falhas no trilho.

As propriedades das seções dos trilhos necessárias na teoria da viga para análise de tensões são calculadas usando a metodologia que assume o desgaste como perda de material [1].

A perda de altura vertical do boleto ocorre em virtualmente todas as linhas férreas, e é o predominante modo de desgaste em curvas tangentes e rasas. Desgaste na face da bitola do trilho é causada pelo contato de carregamentos aplicados no lado do boleto pela borda da roda, e é mais pronunciado em curvas maiores que 3 ou 4 graus.

As implicações seguras de se permitir que um defeito conhecido se propague sem uma imediata intervenção e a influência do desgaste do boleto, são examinadas nesse trabalho através de análises feitas pela mecânica da fratura. Essas análises são aplicadas especificamente para determinar: (1) o tamanho em que se espera que o defeito interno possa falhar (tamanho crítico), (2) o tempo que levará para o defeito crescer de um tamanho inicial detectado até o crítico (vida remanescente) e (3) a influência do desgaste do boleto. Assim, o tempo de crescimento seguro deve ser considerado como a margem de segurança antes de ser feita uma intervenção necessária.

Defeitos transversais internos são abordados nesse trabalho porque, representam os defeitos mais comuns de se encontrar em trilhos continuamente soldados e porque eles são o tipo de defeito cujo conceito de retardo da intervenção corretiva tem se baseado. Os cálculos apresentados utilizam a metodologia desenvolvida por Orringer [2].

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos estudos propostos neste trabalho foram utilizadas duas famílias de trilhos, ambos produzidos e laminados pela empresa. Um dos lotes de trilhos analisados foi retirado da via permanente, onde estavam instalados desde a sua inauguração e tendo sido fabricados no início dos anos 80. O outro lote de trilhos analisado foi produzido em 1995 e não chegou a ser instalado na via. A Tabela 1 traz as propriedades mecânico-metalúrgicas determinadas em um estudo prévio para esse material [3].

Tabela 1. Propriedades Metalúrgicas para trilhos novos e usados [11].

		Tamanho de Grão	Dureza	
Trilho Novo		4	315	
Trilho Usado		6	375	
Ensaio de tração	$\sigma_{2\%}$ (MPa)	$\sigma_{\text{Máximo}}$ (MPa)	Alongamento* (%)	Red. Área (%)
Trilho Novo	680	1072	15	23,3
Trilho Usado	797	1103	14,6	18
Tenacidade à fratura		valores médios		desvios padrão
Trilho Novo		39,6 MPa m ^{1/2}		1,60 MPa m ^{1/2}
Trilho Usado		43,2 MPa m ^{1/2}		1,69 MPa m ^{1/2}
Regressões de curvas da/dNxΔK	C		P	R
Trilho Novo	2,3x10 ⁻¹¹		4,1	0,942
Trilho Usado	2,0x10 ⁻¹¹		4,3	0,984

Fator de Intensidade de Tensões para Defeitos Transversais:

Para tamanhos menores que 50% da área do boleto (%HA), o defeito transversal é assumido como encaixado em uma falha elíptica localizada na vizinhança da bitola superior do canto do boleto do trilho, como observado na Figura 1. As dimensões dos defeitos são caracterizadas pelos semi-eixos maior e menor da elipse, a e b , respectivamente. Medições em trilhos contendo defeitos transversais revelaram que a razão b/a é tipicamente igual a 0,7.

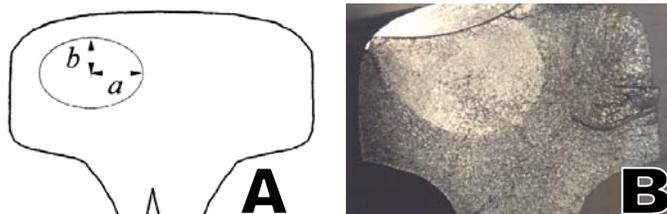


Figura 1. Em A um desenho esquemático e em B uma macrografia do defeito transversal no boleto do trilho.

A fórmula para o fator de intensidade de tensões, ou “K” para a falha elíptica encaixada no boleto mostrada na Figura 1 tem a seguinte forma matemática:

$$K := \frac{2}{\pi} \cdot Ms \cdot M1 \cdot (\sigma_r + \sigma_t + Mg \cdot \sigma_b) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1)$$

onde, a é o semi-eixo maior da falha elíptica, Ms é o fator de amplificação da tensão que conta para a forma elíptica da falha, e $M1$ é o fator de amplificação que conta para os contornos finitos. Os fatores de amplificação para os defeitos transversais foram derivados da referência [4]. O aspecto da forma elíptica da razão $b/a = 0,7$, corresponde a um $Ms=0,984$. O fator de amplificação $M1$ é dado por:

$$M1 := \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left[\frac{1 - \frac{X}{100}}{\frac{A}{Ah}} \right] \cdot \tan \left[\frac{\pi}{2 \cdot \left(1 - \frac{X}{100} \right)} \cdot \left(\frac{A}{Ah} \right) \right]} \cdot \left[\frac{0.63 + \frac{2.02}{\left(1 - \frac{X}{100} \right)} \cdot \left(\frac{A}{Ah} \right) + 0.37 \cdot \left[1 - \sin \left[\frac{\pi \cdot \left(\frac{A}{Ah} \right)}{2 \cdot \left(1 - \frac{X}{100} \right)} \right] \right]^3}{\cos \left[\frac{\pi}{2 \cdot \left(1 - \frac{X}{100} \right)} \cdot \frac{A}{Ah} \right]} \right] \quad (2)$$

Onde X é a medida do nível de desgaste em termos de porcentagem da área do boleto (%HA).

Análise das Tensões para Trilhos com Defeitos Transversais:

O crescimento das fraturas progressivas é governado por tensões com direções perpendiculares ao oposto da superfície da trinca e paralelos a superfície de rotação (componente longitudinal). Além disso, a tensão longitudinal no trilho é assumida como constituída de efeitos de flexão (passagem do trem), tensões residuais e térmicas[4].

Tensões de Flexão:

Na presente análise, assume-se que o trilho se comporte como uma viga em alicerce linear elástico representando o lastro de suporte [5]. Além disso, as tensões de flexão são calculadas usando a teoria da viga [6].

A teoria da viga para crescimento de defeitos em trilhos é descrita em detalhes nas referências [4,7].

As tensões fletoras nos trilhos compreendem as componentes fletoras vertical e lateral. Para o trilho modelado como uma viga em fundação elástica, a máxima tensão trativa no boleto ocorre a alguma distancia do ponto de aplicação da carga. Esse fenômeno é referido como flexão “reversa”. Em termos de valores absolutos, o momento fletor máximo ocorre diretamente abaixo do carregamento

da roda. A referência [8] descreve, a localização do máximo momento reverso para a flexão vertical relativa a posição da roda. A tensão fletora usada na equação (1) para análise da fratura é assim calculada:

$$\sigma_B = \frac{M_V(x_0) \cdot (h - h_N)}{I_{yy}} + \frac{M_L(x_0) \cdot w_H}{2I_{zz}} \quad (3)$$

Tensão residual:

Uma fórmula empírica foi derivada de resultados prévios de pesquisa [4,9], que relatam a magnitude da tensão residual na cabeça do trilho para o tamanho do defeito transversal.

$$\sigma_r := 10 - 0.125 \cdot A \quad (4)$$

Onde HA é a área do boleto. De acordo com essa fórmula, a tensão residual no trilho é maior para defeitos transversais menores.

Tensões Térmicas:

Para trilhos continuamente soldados, completamente comprimidos em linha férrea tangente, a tensão térmica é calculada pelo produto do coeficiente de expansão térmica linear pelo módulo de elasticidade e pela diferença entre a temperatura neutra TN (livre de tensões residuais) e a de trabalho T.

$\sigma_t := \alpha \cdot E \cdot (T_n - T)$ para defeitos maiores que 10% e menores que 80% de HA (5), onde $\alpha = 11,7 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ e $E = 207 \text{ GPa}$.

Tamanho Crítico do Defeito:

Da equação (1), o fator de intensidade de tensão varia com o tamanho do defeito, a quantidade de desgaste e a temperatura. Assim, com o decréscimo da temperatura ambiente, a tensão térmica no trilho torna-se mais trativa e o tamanho do defeito cuja fratura é esperada torna-se menor.

Os tamanhos críticos de defeitos foram calculado para o carregamento de uma única roda de locomotiva com carregamento vertical de 33 toneladas, lateral igual à metade do vertical e rigidez da fundação de 20,7 MPa. O carregamento estático da roda foi aumentado por um fator igual a 1,5, devido a efeitos dinâmicos tais como irregularidades na roda ou no trilho. Foi escolhida a temperatura de trabalho de 10 C, por essa ser relativamente baixa para a maioria das ferrovias localizadas no Brasil.

Crescimento dos Defeitos Transversais Baseado na Mecânica da Fratura:

No caso do movimento do trem sobre o trilho, os ciclos de tensão têm variação na amplitude, conforme mostrado esquematicamente na figura 2. Os vales e os picos dessas variações definem as tensões fletoras mínimas e máximas, que produzem um ciclo de tensão. Para essa amplitude de

carregamento, o tempo de crescimento seguro para um defeito propagar de um tamanho inicial até o tamanho crítico, pode ser calculado por [10]:

$$n(T) := \left[\int_{a}^{a_{acr}} \left[C \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta\sigma^P}{(1-R)^Q} \right] \cdot \frac{1}{(G\sqrt{a})^P} da \right] \quad (6)$$

onde n é o número de grupos de 5 ciclos que é visto como dependente da temperatura. A equação inclui ainda as constantes empíricas P, Q e C, que foram determinadas através de regressão linear de curvas da/dN x ΔK de ensaios realizados. Os grupo de 5 ciclos de carregamento mostrado na Figura 2 e corresponde ao carregamento de 4 eixos X 33 toneladas por eixo = 132 toneladas brutas.

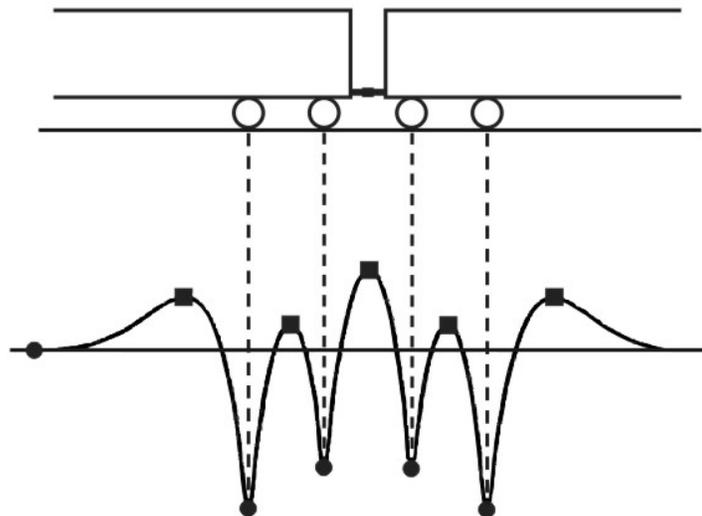


Figura 2. Ciclos de tensão de Flexão produzido pelo final de dois vagões adjacentes.

Para aplicações ferroviárias, é conveniente converter esse número em tonelagem carregada sobre os trilhos. A tonelagem bruta pode ser convertida em dias de tempo de crescimento seguro se a tonelagem diária é conhecida. Assim, o tempo de crescimento seguro pode ser calculado por:

$$\text{Dias}(T) := \frac{132}{TD} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Ah}{100 \cdot \pi} \right)^{\left(\frac{1-P}{2} - \frac{P}{4} \right)} \cdot \int_{A_i}^{A_f} \frac{1}{\Sigma \cdot (Ga \cdot \sqrt{A})^P \cdot \sqrt{A}} dA \quad (7)$$

onde TD se refere a tonelagem bruta diária de 500000 e Σ, se refere ao somatório do dano por 5 ciclos do espectro de carregamento, que depende do tamanho do defeito e da temperatura:

$$\Sigma(A, T) := C \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta\sigma^q}{(1-R)^q} \quad (8)$$

Nos cálculos de crescimento do defeito, as tensões estáticas de flexão estão multiplicadas por dois fatores: (1) o fator de magnificação do gradiente de tensões, Mg que depende do tamanho do defeito e da taxa de carregamento lateral-para-vertical da roda e (2) um fator dinâmico de carregamento de 2 o que corresponde a um trem com velocidade de 65 Km/h, de acordo com o estabelecido pela fórmula de carregamento [10]. Além disso, as tensões máximas e mínimas para crescimento de defeitos, são calculadas pela superposição das tensões térmicas e residuais com a tensão de flexão modificada. Nos cálculos, o crescimento do defeito é assumido como ocorrido somente durante o ciclo trativo de tensão. Matematicamente, se a tensão mínima é negativa, considera-se como igual a zero.

RESULTADOS

A equação (1) foi igualada às tenacidades à fratura dos trilhos novos e usados. Os resultados desse procedimento numérico são mostrados esquematicamente na Tabela 2.

Tabela 2. Listagem dos tamanhos críticos em %HA, para diferentes níveis de desgaste e Temperatura de 10C.

Nível de desgaste (%)	Trilho Novo	Trilho Usado
10	41,47	49,36
20	37,08	44,13
30	33,09	39,38

As Tabelas 3 e 4 listam os tempos de crescimento seguro em dias para três diferentes tamanhos de defeitos transversais iniciais e três diferentes níveis de desgaste para o trilhos 136 RE novo e usado, em fundação de rigidez igual a 20,7 MPa e 500000 toneladas brutas trafegadas por dia.

Tabela 3. Influência do tamanho de defeito inicial e do nível de desgaste para o trilho novo cujas constantes são $C=2,4 \times 10^{-11}$, $P=4,3$, $K_{IC}=39,6$ e temperatura de trabalho de 10 C.

Desgaste	0%	10%	20%	30%
A inicial				
10 % HÁ	37,14	33,25	28,97	24,24
15 % HÁ	26,31	22,15	17,74	13,17
20 % HA	18,61	14,45	10,35	6,51

Tabela 4. Influência do tamanho de defeito inicial e do nível de desgaste para o trilho usado cujas constantes são $C=2,0 \times 10^{-11}$, $P=4,1$ e $K_{IC}=43,2$ e temperatura de trabalho de 10 C.

Desgaste	0%	10%	20%	30%
A inicial				
10 % H_A	54,58	49,04	42,91	36,12
15 % H_A	39,31	33,28	26,87	20,17
20 % H_A	28,26	22,16	16,09	10,35

DISCUSSÕES

Estratégias de inspeção de tolerância ao dano podem ser desenvolvidas baseadas nesses resultados. Por exemplo, se o tamanho do defeito detectado ou o nível de desgaste ainda não chegaram próximos aos críticos, ações corretivas podem ser adiadas por períodos de tempo dados pela relação entre tamanho de defeito não crítico e níveis de desgaste listados nas tabelas 3 e 4.

Os resultados obtidos e nas Tabelas 3 e 4, referentes ao tempo remanescente correspondente aos níveis mínimos de desgaste, apresentam-se superiores aos obtidos em outros estudos [12].

Os prováveis motivos dessa diferença sejam: a maior temperatura utilizada nos cálculos e a maior tenacidade à fratura dos materiais analisados nesse trabalho.

Os resultados apresentados nesse trabalho assumem que o tamanho do defeito medido no momento da detecção é igual ao tamanho de defeito verdadeiro. Na prática, entretanto, muitos fatores contribuem para variações, de modo que as medidas feitas em campo podem ser maiores ou menores que o tamanho verdadeiro do defeito. Conseqüentemente, predições sobre tempos de crescimento seguro devem ser diferentes daqueles experimentados em campo.

CONCLUSÕES

O tempo de crescimento seguro é maior se o tamanho do defeito inicial detectado é menor.

Quanto maior o nível de desgaste, menor será a vida remanescente de trilhos portadores de defeitos transversais, visto que, menor será a área do boleto, cujo defeito poderá se propagar.

O estudo de parâmetros como desempenho em fadiga, seu desempenho frente à propagação de trincas e sua tenacidade à fratura são fundamentais para o aumento da confiabilidade de vias ferroviárias, bem como para evitar acidentes que possam trazer como conseqüências perdas humanas, econômicas e prejuízos ambientais.

Os resultados dessas análises poderiam ser aplicados para desenvolver estratégias de tolerância de defeitos para inspeção de trilhos e os respectivos intervalos de inspeção.

Agradecimentos

À Capes pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Jeong D. Y., et al., Propagation Analysis of Transverse Defects Originating at the Lower Gage Corner of Rail, Final Report, DOT/FRA/ORD-98/06, 1996.
- 2 Jeong D. Y., Damage tolerance analyses of detail fractures in rail, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1997.
- 3 Fontoura Limberger I., Estudo da Propagação de Trincas Transversais por Fadiga em Trilhos Ferroviários, PPGEM 2002.
- 4 Orringer O. et al. Crack Propagation Life of Detail Fractures in Rails, Volpe National Transportation Systems Center Report No. DOT/FRA/ORD-88/13, 1988.
- 5 Hetenyi M., Beams on Elastic Foundation, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1983.
- 6 Timoshenko a., Langer B. F., Stresses in rail road track, ASME Trans. 54 (1932).
- 7 Orringer O., Morris J. M., Jeong D. Y., Detail Fracture Growth In Rails, Theoretical and Applied Fracture Mechanics.
- 8 Jeong D. Y., Tang Y. H., Orringer O., Estimation of Rail Wear Limits Based on Rail Strength Investigations, DOT/FRA/ORD-98/06, 1998.
- 9 Clayton, Y. H. Tang, Detail fracture growth rates in cured track at the Facility for Accelerated Service Testing, 1992.
- 10 Orringer O, Rapid estimation of spectrum crack growth life based on the Palmgren-Miner rule, Comput, 1984.
- 11 11) Mc Gee G. M., Calculations of Rail Bending Stresses for 125 –Ton Tank Cars, AAR Tank Cars, AAR Research Center arch Center Report, 1965.
- 12 12) Jeong D. Y., Damage tolerance analyses of detail fractures in rail, Theoretical and applied Fracture Mechanics, 1997.

REMAINING LIFE ANALYSIS ON WORN RAILROAD RAILS

*Eduardo Luis Schneider
Afonso Reguly
Marcio Kramer de Macedo
Inácio da Fontoura Limberger*

Abstract

The objective of this work was to study the behavior of railroad rails using fracture mechanics parameters to increase operational safety. In this study mechanical-metallurgical characterization had been carried out for new and used railroad rails. Tests consisted of static tensile test, hardness and fracture mechanics, K_{IC} and $da/dN \times \Delta K$ curves tests. Fracture mechanics models developed by Orringer and others were used to evaluate the critical flaw size, the time that the defect can grow to a certain size up to the critical size. The influence of wear in the rail head was also taken into account.

Key-words: Railroad rails; Fracture mechanics; Wear; Operational safety.