

ANÁLISE DA VIDA ÚTIL DE TRILHOS COM DEFEITOS TRANSVERSAIS DESGASTADOS EM SERVIÇO

SCHNEIDER, Eduardo Luis¹; REGULY, Afonso²

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, KIC e determinação de curvas $da/dN \times \Delta K$. Parte dos ensaios e resultados (ensaios de tração e de dureza) foram extraídos de relatórios de caracterização de trilhos produzidos previamente pelo Laboratório de Metalurgia Física LAMEF da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. 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. Os resultados obtidos podem ser aplicados para desenvolver intervalos estratégicos de inspeção de tolerância ao dano.

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

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, KIC and $da/dN \times \Delta K$ curves tests. Some of the analyses and results (tensile and hardness tests) were extracted from rail characterizations works done in Laboratory of Physical Metallurgy – LAMEF of Federal University of Rio Grande do Sul. 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. The results obtained can be applied in the development of damage-tolerant strategies to assess rail inspection intervals.

Keywords: Railroad rails. Fracture mechanics. Wear. Operational safety.

¹ Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale.

² Departamento de Metalurgia, PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário é um dos meios mais práticos, eficazes e econômicos para realizar o deslocamento de grandes volumes de carga. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Ferroviária, o Brasil possui cerca de 28 mil quilômetros de ferrovias que interligam as várias regiões do país e como grande produtor de minérios, possui três das maiores ferrovias do mundo. Só para fins de comparação, os custos referentes ao frete do transporte ferroviário são cerca de 50% mais baixos do que os correspondentes ao transporte rodoviário.

Os trilhos estão sujeitos a defeitos de fabricação que vão desde defeitos metalúrgicos, formados durante a solidificação do lingote (como segregações, inclusões e trincas de solidificação) ou no processo de laminação (dobras). Há deformações que são originadas partir da ação repetida do carregamento exercido pelas rodas no trilho pela passagem do trem, que, além de poder formar deformidades, é também responsável pela propagação de trincas. Esses defeitos afetam a integridade dos trilhos ferroviários, já que aumentam os riscos de falhas que podem ocasionar acidentes e trazer, como consequência, perdas humanas e econômicas além de prejuízos ambientais.

Atualmente, a tendência das administradoras de ferroviárias é aumentar cada vez mais o número de composições que trafegam na via e também aumentar a carga por vagão (o que eleva o carregamento médio da roda e a frequência de carregamento experimentado pelo trilho). Uma das consequências é a maior ocorrência de defeitos internos, aumentando sua taxa de crescimento. Essas consequências 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 tão logo um defeito no trilho seja 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 à medida que o veículo vai inspecionando a ferrovia. Entretanto, a distância que o carro detector pode inspecionar é limitada ao número de reparos que conseguem ser feitos em um dia. A Figura 1 mostra uma fotografia de um carro detector que utiliza a técnica de ultrassom.



Figura 1: Carro detector de defeitos que utiliza a técnica de ultrassom [MARAIS, 2003].

Uma estratégia alternativa para lidar com defeitos detectados é permitir que falhas com tamanhos específicos permaneçam em serviço por um certo período de tempo, antes que ocorra uma intervenção. Ou seja, defeitos detectados com dimensões reduzidas, que ainda levarão certo tempo para atingirem um tamanho considerado crítico para o carregamento imposto pela passagem da roda, podem continuar na via de forma segura, sendo removidos ou recuperados apenas aqueles que ofereçam risco de ruptura urgente. 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 [JEONG, 1996]. Além de alterar a seção resistente, o desgaste altera o momento de inércia e posição da linha neutra. A perda de altura vertical do boleto ocorre em todas as linhas férreas e é o predominante modo de desgaste em curvas tangentes e rasas. O desgaste na face da bitola do trilho é causado pelo contato de carregamentos aplicados no lado do boleto pela borda da roda e é mais pronunciado em curvas maiores que três ou quatro 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 examinados 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.

Entre os estudos sobre defeitos em trilhos, particular foco tem sido dado a um defeito transversal interno chamado de “trinca transversal de fadiga” (*detail fracture*) porque este é o defeito de fadiga mais comum encontrado em linhas continuamente soldadas. Esta deformação passa a ser muito perigosa, já que provoca a fratura com a passagem do trem e pode ocasionar seu descarrilamento [ORRINGER, 1986]. A Figura 2 mostra um desenho esquemático de um trilho com uma trinca transversal em A, uma fotografia de um trilho que fraturou devido a uma trinca transversal em B e em C outra fotografia com o acidente provocado pelo descarrilamento.



Figura 2: Desenho esquemático de um trilho com trinca transversal em A e uma fotografia de um trilho que fraturou devido a esse tipo de defeito em B. Em C, uma fotografia mostrando um acidente provocado pelo descarrilamento ocasionado pela fratura.

O desgaste da superfície do boleto e os defeitos transversais internos são abordados nesse trabalho porque representam os defeitos mais comuns encontrados em trilhos continuamente soldados, e porque eles são o tipo de defeito cujo conceito de retardo da intervenção corretiva vem se baseando [JEONG, 1997]. Os cálculos apresentados utilizam a metodologia desenvolvida por Orringer [ORRINGER, 1988].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O perfil dos trilhos empregados neste trabalho é do tipo Vignole. Esses trilhos são classificados por normas que os classificam através de suas características geométricas. Na presente análise ambos os trilhos possuem o mesmo perfil, cuja denominação é 136 RE. Ele possui 136 libras de peso por jarda de comprimento, o que justifica sua denominação. Para a norma

brasileira, ABNT, que usa o sistema internacional de unidades de medidas, este perfil possui 67,37 kg por metro de comprimento e é denominado TR-68.

No Brasil (e em vários outros países) o perfil de trilho utilizado por ferrovias que transportam quantidades muito elevadas de carga é o TR - 68. As principais são: a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), a MRS Logística SA (antiga Rede Ferroviária Federal SA - RFFSA) e a Estrada de Ferro Carajás (EFC). Dentre elas, a EFC se destaca por transportar a maior quantidade de carga por ano (mais de 65 MTB) com uma carga por eixo de 30 toneladas. Além disso, na Serra dos Carajás há uma jazida de minério de ferro de alto teor (média de 66%) calculada em 18 bilhões de toneladas. Essa quantidade é suficiente para, mantido os níveis atuais, garantir a produção por mais 400 anos.

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 [LIMBERGER, 2002].

Tabela 1: Propriedades Metalúrgicas para trilhos novos e usados.

		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	

2.1 FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES PARA DEFEITOS TRANSVERSAIS

Para defeitos transversais com área menor que 50% da área do boleto (%HA), pode-se considerar que estes tenham a forma de uma elipse e se localizam próximo do canto da bitola, como mostra a Figura 3. As dimensões dos defeitos são caracterizadas pelos semieixos 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.

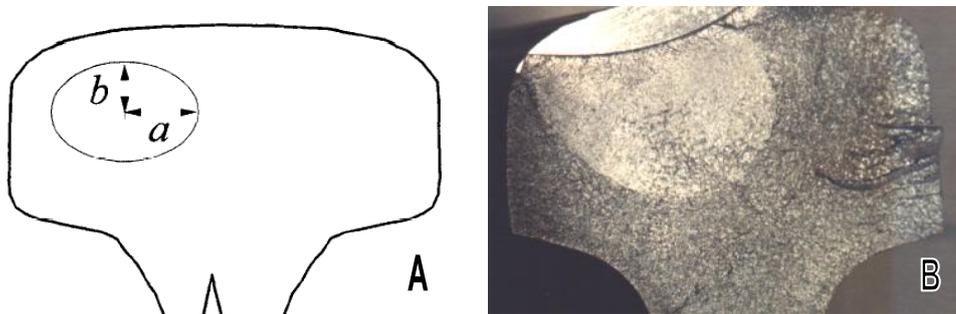


Figura 3: Em A um desenho esquemático e em B uma macrografia do defeito transversal no boleto do trilho.

A fórmula para o fator de intensidade de tensões, ou “K” para a falha elíptica encaixada no boleto mostrada na Figura 3 tem a seguinte forma matemática:

$$K := \frac{2}{\pi} \cdot M_s \cdot M_a \cdot (\sigma_r + \sigma_t + M_g \cdot \sigma_b) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1)$$

Onde, “ a ” é o semieixo maior da falha elíptica, “ M_s ” é o fator de amplificação da tensão que conta para a forma elíptica da falha (relaciona a área do defeito e a distância do centro do defeito aos eixos de simetria da seção do trilho). “ M_a ” é o fator de amplificação que conta para os contornos finitos (relaciona a área do defeito e a área do boleto), “ M_g ” é o fator que conta para o gradiente de tensão local, “ σ_r ”, “ σ_t ” e “ σ_b ”, referem-se às tensões residual, térmica e fletora respectivamente. Medições em trilhos contendo defeitos transversais revelaram que a razão b/a é tipicamente igual a 0,7 e corresponde a um M_s de 0,984 [ORRINGER, 1988]. O fator de amplificação M_a leva em conta a perda de área do boleto devida ao desgaste e é dado por:

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

Em que “A” é o tamanho do defeito em termos de área ($A = \pi.a.b$), “Ah” é a área de um boleto não desgastado (novo) e “X” é o nível de desgaste em %HA.

2.2 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 à superfície de rodagem (componente longitudinal). Além disso, a tensão longitudinal no trilho é assumida como constituída de efeitos de flexão (passagem do trem), tensões residuais e térmicas [ORRINGER, 1988].

2.2.1 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 [HETENYI, 1983]. Além disso, as tensões de flexão são calculadas usando a teoria da viga [TIMOSHENKO, 1932].

A teoria da viga para crescimento de defeitos em trilhos é descrita em detalhes nas referências [ORRINGER, 1986 e ORRINGER, 1988]. 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 à posição da roda. A tensão fletora usada na equação (1) para análise da fratura é assim calculada:

$$\sigma_b := \frac{M_{vx} \cdot z_{mod}}{I_{yyd}} + \frac{M_l \cdot y}{I_{zzd}} \quad (3)$$

“Zmod” é a distância entre o centro do defeito e o centróide do trilho, “Mvx” é momento fletor vertical em função da posição longitudinal ao longo do trilho, “Iyyd” e “Izzd” são os momentos de inércia de área (ou momento estático de segunda ordem) em relação ao eixo horizontal e vertical respectivamente que passam através do centróide do trilho em função do nível de desgaste do boleto.

2.2.2 Tensão residual

Uma fórmula empírica foi derivada de resultados prévios de pesquisa [CLAYTON, 1992], que relatam a magnitude da tensão residual na cabeça do trilho para o tamanho do defeito transversal, onde “HA” é a área do boleto.

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

De acordo com essa fórmula, a tensão residual no trilho é maior para defeitos transversais menores. Ocorre que defeitos menores estão mais tracionados, pois se localizam mais próximos da região deformada plasticamente da superfície do boleto. À medida que eles crescem, a distância entre a frente de propagação (extremidade do defeito) e a camada encruada aumenta, e por isso, a tensão residual trativa diminui.

2.2.3 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 (α) pelo módulo de elasticidade (E) e pela diferença entre a temperatura neutra Tn (temperatura de projeto, na qual não deve existir tensão térmica) e a de trabalho T

$$\sigma_t := \alpha \cdot E \cdot (T_n - T) \quad (5)$$

Para defeitos maiores que 10% e menores que 80% de HA e onde $\alpha = 11,7 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ e $E = 207 \text{ GPa}$.

2.3 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 calculados 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 KPa. O carregamento estático da roda foi aumentado por um fator igual a 2, devido a efeitos dinâmicos tais como irregularidades na roda ou no trilho e por este ser o fator dinâmico de carregamento que corresponde a um trem com velocidade de 65 Km/h. Foi escolhida a temperatura de trabalho de 10 °C, por ser a mais baixa registrada na região da Via estudada.

2.4 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 4. 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 (grupo de cinco ciclos), o tempo de crescimento seguro para um defeito propagar de um tamanho inicial até o tamanho crítico, pode ser calculado por:

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

Onde “n” é o número de grupos de cinco 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 K de ensaios realizados. Os grupo de cinco ciclos de carregamento mostrado na Figura 4 e corresponde ao carregamento de 4 eixos X 33 toneladas por eixo = 132 toneladas brutas.

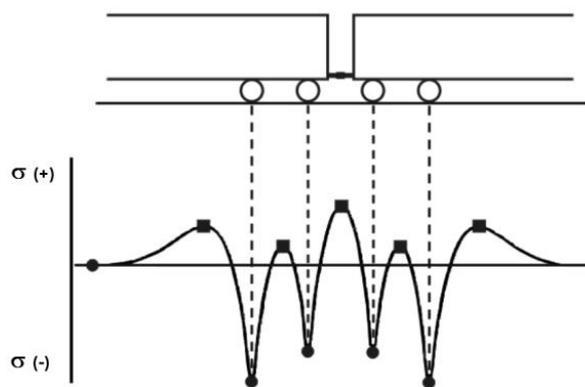


Figura 4: Ciclos de tensão de Flexão produzido pelo final de dois vagões adjacentes.

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:

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

Onde TD se refere a tonelagem bruta diária de 500000 que depende do tamanho do defeito e da temperatura:

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

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 [ORRINGER, 1984]. 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

3 RESULTADOS

Usando os valores levantados em experimentos, das características da via e das equações da literatura, puderam ser obtidos os seguintes resultados. A equação (1) foi igualada às tenacidades e à fratura dos trilhos novos e usados. Os resultados desse procedimento numérico são mostrados na tabela 2.

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

Nível de desgaste (%)	Trilho Novo	Trilho Usado
10	31,8	40,1
20	20,6	25,8
30	11,38	14,3

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 KPa 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 \ Área inicial	Desgaste			
	0%	10%	20%	30%
10 % HA	59,7	54,6	48,6	42,3
15 % HA	34,3	29,6	24,3	19,1
20 % HA	19,7	15,8	11,8	8,2

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 \ Área inicial	Desgaste			
	0%	10%	20%	30%
10 % HA	94,5	86,7	77,3	67,8
15 % HA	55,6	48,2	40,1	31,6
20 % HA	32,7	26,5	20,1	14,0

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 nas tabelas 3 e 4, referentes ao tempo remanescente correspondente aos níveis mínimos de desgaste, apresentam-se superiores aos obtidos em outros estudos [JEONG, 1997].

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 aqui apresentados 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.

4 CONCLUSÃO

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 consequências, 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.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA FERROVIÁRIA. Disponível em: <<http://www.abifer.org.br>>. Acesso em: 12 mar. 2005.
- CLAYTON, Y. H. Tang. **Detail fracture growth rates in cured track at the Facility for Accelerated Service Testing**. 1992.
- FONTOURA LIMBERGER I. **Estudo da Propagação de Trincas Transversais por Fadiga em Trilhos Ferroviários**. PPGEM, UFRGS, 2002.
- HETENYI M. Beams on Elastic Foundation. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1983. In:
- TIMOSHENKO a., Langer B. F. **Stresses in rail road track**, ASME Trans. 54, 1932.
- JEONG, D. Y. Damage tolerance analyses of detail fractures in rail. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 28, p. 109-115, 1997.
- 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.
- JEONG D. Y.; TANG Y. H.; ORRINGER O. **Estimation of Rail Wear Limits Based on Rail Strength Investigations**. DOT/FRA/ORD-98/06, 1998.
- MARAIS, J. J.; MISTRY, K. C. **Rail Integrity Management by Means of Ultrasonic Testing**. Blackwell Publishing Ltd. Fatigue Fract Engng Master Struct 931-938, 2003.
- Mc GEE G. M. **Calculations of Rail Bending Stresses for 125 –Ton Tank Cars**. AAR Tank Cars, AAR Research Center arch Center Report, 1965.

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.

ORRINGER O.; MORRIS J. M.; JEONG D. Y., **Detail Fracture Growth In Rails**. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Test Results, 1986.

ORRINGER O. **Rapid estimation of spectrum crack growth life based on the Palmgren-Miner rule**. Comput, 1984.