

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE TRABALHO NO TEMPO DE CRESCIMENTO SEGURO DE TRINCAS TRANSVERSAIS EM TRILHOS FERROVIÁRIOS ¹

Eduardo Luis Schneider²
Afonso Reguly³
Marcio Kramer de Macedo⁴

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 dois trilhos utilizados em ferrovias brasileiras. Foram realizados ensaios estáticos de tração, ensaios de dureza, ensaios da mecânica da fratura, K_{IC} e determinação de curvas $da/dN \times \Delta K$ (taxa de propagação de trinca pela variação do fator de intensidade de tensões). Uma vez determinadas as características mecânico-metalúrgicas dos trilhos, foram analisados o crescimento de defeitos transversais internos através de fórmulas de 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 da temperatura de trabalho.

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

THE INFLUENCE OF THE WORKING TEMPERATURE ON THE TIME OF SAFE DETAIL FRACTURE GROWTH IN RAILS

Abstract

The aim of this work was to characterize railway rails properties fundamental for its safe use. Included in those are the fatigue crack growth behavior and fracture toughness. In this work mechanical and metallurgical characterization of rails from two different producers were performed. Tensile, hardness, fracture toughness, K_{IC} , and fatigue crack propagation $da/dN \times \Delta K$ tests were performed. Those results were used to evaluate the detail fracture growth in rails with the use of fracture mechanics equations developed by Orringer. Those equations were used to evaluate the critical crack size for failure, the time for a crack growth from a given initial flaw size until fracture and the influence of the working temperature on the time for failure.

Key words: Railway rails; Fracture mechanics; Temperature.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61ª Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Engenheiro Metalurgista, Doutorando em Engenharia no PPGEM – UFRGS.

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

⁴ Engenheiro Metalurgista, Doutorando em Engenharia no PPGEM – UFRGS.

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. Para facilitar reparos e substituições nos trilhos, os técnicos seguem o carro detector, na medida em que esse vai inspecionando a ferrovia. Entretanto, a distância que o carro detector pode inspecionar nas ferrovias é confinada por um número de reparos que conseguem ser feitos em um dia. Uma alternativa estratégica para lidar com defeitos detectados é permitir defeitos com tamanho específico a permanecerem em serviço por 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.⁽¹⁾

As implicações seguras de se permitir que um defeito conhecido se propague sem uma imediata intervenção e a influência da temperatura de trabalho 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 da temperatura de trabalho. 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 pois são os defeitos mais comumente encontrados em trilhos continuamente soldados e porque eles são os tipos de defeito cujo conceito de retardo da intervenção corretiva tem se baseado. Os cálculos de vida remanescente são baseados na metodologia desenvolvida por Orringer e outros.⁽²⁾

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais avaliados nesse trabalho são segmentos de trilhos produzidos por dois diferentes fabricantes de procedência européia (grau 260 da norma prEN 13674-1) e utilizados em ferrovias brasileiras. Os trilhos foram identificados como Fabricantes A e B. A Tabela 1 traz as propriedades mecânico-metalúrgicas determinadas em um estudo prévio para esses materiais.

Tabela 1. Propriedades mecânico-metalúrgicas para os trilhos Fabricante A e Fabricante B.

	Tamanho de Grão		Dureza (HV)		
Fabricante A	6		313		
Fabricante B	8		337		
	Força (kN)	W (mm)	B (mm)	A (mm)	K_{IC} (MPa·m^{1/2})
Fabricante A	6,89	30,1	14,8	15,5	33,9
Fabricante B	7,75	29,8	14,8	16,1	37,3
	ΔK 10 MPa m^{1/2}	ΔK 13,5 MPa m^{1/2}	C (m.(MPa·m^{1/2})⁻⁴.ciclo⁻¹)	C (in.(Ksi.in^{1/2})⁻⁴.ciclo⁻¹)	P
Fabricante A	11,06	40,25	5x10 ⁻¹³	1x10 ⁻¹¹	4,31
Fabricante B	8,70	26,10	2x10 ⁻¹²	6x10 ⁻¹¹	3,64

O crescimento de trincas por fadiga é dirigido pelo carregamento cíclico produzido pelo carregamento das rodas. Ciclos de tensão são criados pela flexão dos trilhos à medida que os trens viajam sobre a linha. O modelo de crescimento de defeito considera somente a componente longitudinal de tensão, porque, quando tracionada, essa componente é associada com a abertura da trinca, que por sua vez conduz ao crescimento da trinca. Entretanto, em adição à flexão, tensões residuais e temperaturas diferentes da neutra (livre de tensão) também contribuem para a magnitude total da tensão longitudinal. Na análise de tensões para defeitos transversais, o estado de tensão para um dado ponto no trilho e para um dado tamanho de defeito é simplesmente a soma das tensões fletoras, residual e térmica na direção longitudinal (perpendicular ao oposto da superfície da trinca e paralela à superfície de rodagem).

Na presente análise, assume-se que o trilho se comporte como uma viga em base elástica representando o lastro de suporte.⁽³⁾ Além disso, as tensões de flexão são calculadas usando a teoria da viga,⁽⁴⁾ cuja aplicação para crescimento de defeitos em trilhos é descrita em detalhes por *Orringer*.⁽⁵⁾

As tensões fletoras nos trilhos compreendem as componentes fletoras vertical, lateral, tensão de empenamento, tensão fletora vertical e lateral no boleto. Essas três últimas atingem valores relevantes somente em curvas fechadas, então, para simplificação dos cálculos, essas três últimas componentes foram desconsideradas. A tensão fletora usada no cálculo do fator de intensidade de tensões para análise da fratura é calculada pela soma das componentes vertical e lateral que são dadas em *Schneider*.⁽⁶⁾

Para o cálculo da Tensão Residual, uma fórmula empírica foi derivada de resultados prévios de pesquisa baseados em dados experimentais obtidos de dois testes separados,^(2,7) que relatam sua magnitude no boleto do trilho em função do tamanho do defeito transversal.

$$\sigma_m := (30 - 2.125 \cdot HA) \quad (\text{Eq. 1})$$

Válida para defeitos maiores que 0% e menores que 10% de *HA*; ou:

$$\sigma_t := (10 - 0.125HA) \quad (\text{Eq. 2})$$

Válida para defeitos maiores que 10% e menores que 80% de HA .

Para trilhos continuamente soldados, 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 T_N (livre de tensões) e a de trabalho T .

$$\sigma_t := \alpha \cdot E \cdot (T_n - T) \quad (\text{Eq. 3})$$

Para trilho de aço, α é igual a $11,7 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ e E igual a 207 GPa. Como indicado na Equação 3, uma temperatura de serviço menor que a temperatura neutra produzirá uma tensão térmica trativa. Neste trabalho assume-se, por simplificação, uma diferença de temperatura média constante ao longo da vida em fadiga do defeito transversal.

Para tamanhos menores que 50% da área do boleto (HA), assume-se que o defeito transversal se encaixe como uma falha elíptica na vizinhança da bitola superior do boleto. A fórmula para o fator de intensidade de tensões, ou “ K ” para a falha elíptica localizada no boleto e mostrada na Figura 1, tem a seguinte forma matemática:

$$K := \frac{2}{\pi} \cdot M_s \cdot M_a \cdot (\sigma_r + \sigma_t + Mg \cdot \sigma_b) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde, a é o semi-eixo 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), Mg 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. (Erro! Indicador não definido.)

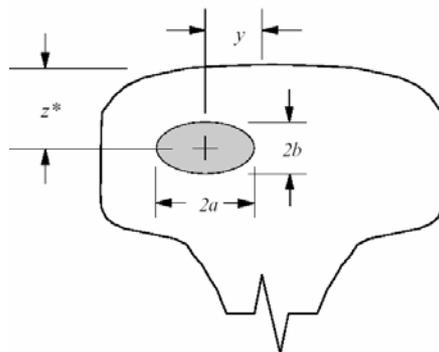


Figura 1. Desenho esquemático do defeito transversal tipo *detail fracture* (8).

O fator de intensidade de tensões varia com a posição ao longo da frente de propagação da trinca.^(9,10) Essa variação também leva em conta se o campo de tensões aplicado é uniforme.⁽¹¹⁾ Isso significa que a razão (b/a) da forma elíptica deveria mudar com o crescimento da trinca. Para simplificar a presente análise, assume-se que o aspecto da razão permanece constante enquanto a trinca cresce. Esse valor médio do

defeito no boleto é referido agora como o gradiente de amplificação de tensões e é dado em Schneider.⁽⁶⁾

Da Equação 4, o fator de intensidade de tensão varia com o tamanho e forma do defeito, o nível de desgaste do trilho e a temperatura. Variando-se valores de tensão residual e térmica pode-se obter valores do fator de intensidade de tensões equivalentes ao valor de tenacidade à fratura do material. Assim, fixando-se o valor de tensão residual e isolando-se a variável a , pode-se obter o tamanho crítico do defeito para uma dada temperatura e nível de desgaste:

$$a_{cr} := \left[\frac{KIC \cdot \pi}{2 \cdot Ms \cdot Ma \cdot (\sigma_r + \sigma_t + Mg \cdot \sigma_b) \cdot \sqrt{\pi}} \right]^2 \quad (\text{Eq. 5})$$

No caso do movimento do trem sobre o trilho, os ciclos de tensão têm variação na amplitude. 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 estável para um defeito propagar de um tamanho inicial até o tamanho crítico, pode ser calculado por:⁽¹²⁾

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

em que $n(T)$ é o número de grupos de cinco ciclos que é visto como dependente da temperatura, $\Delta\sigma$ é definido como a diferença entre as tensões máximas e mínimas atuantes no ciclo, R é a razão entre a tensão máxima e a mínima, e G é o fator geométrico que depende do tamanho do defeito e é dado por:

$$G := \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot Ma \cdot Ms \quad (\text{Eq. 7})$$

Na Equação 6 tem-se o somatório que se refere ao dano produzido por 5 ciclos do espectro de carregamento, que depende do tamanho do defeito, da temperatura e da distância entre os eixos. Esse grupo de 5 ciclos de carregamento é mostrado esquematicamente na Figura 2 e corresponde à passagem de 4 eixos de dois vagões adjacentes.

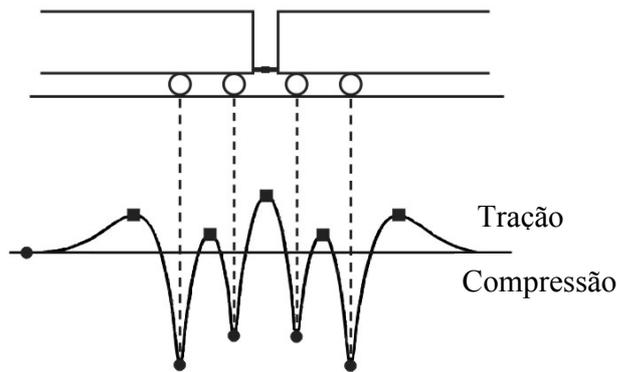


Figura 2. Desenho esquemático dos ciclos de tensão de Flexão produzido por dois vagões adjacentes. Adaptado de Orringer.⁽¹⁾

Para aplicações ferroviárias é conveniente converter o número de ciclos 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 estável pode ser calculado por:

$$\text{Dias}(T) := \left[\frac{CP}{TD} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Ah}{100 \cdot \pi} \right)^{\left(\frac{1-P}{2} - \frac{P}{4} \right)} \right]_{Ai}^{\circ Af} \cdot \frac{1}{C \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta\sigma^P}{(1-R)^Q} \cdot (G \cdot \sqrt[4]{A})^P \cdot \sqrt{A}} dA \quad (\text{Eq. 8})$$

em que CP é o carregamento resultante da passagem de quatro eixos que provocam os cinco ciclos de carregamento, TD refere-se à tonelagem bruta diária. A variável de integração foi mudada de a na Equação 6 para A na Equação 8. Isso resultou em termos adicionais que aparecem na mesma que é deduzida através da derivação dada em Schneider.⁽⁶⁾

A passagem de quatro eixos de dois vagões adjacentes provocam a variação da tensão fletora longitudinal ao longo do trilho. Os vales e picos dessa variação definem as tensões mínimas e máximas, que por sua vez definem os ciclos de tensão. Essas tensões são dependentes da distância entre os eixos. Uma vez que os espaçamentos típicos para um vagão de 120 toneladas são da ordem de 1,78 m entre eixos do mesmo truque e de 2,16 m entre eixos de vagões adjacentes, para o presente cálculo, foram consideradas essas distâncias.

De posse dos valores das propriedades do material e dados referentes à geometria do trilho (levando em conta a perda em área pelo desgaste), primeiramente calculou-se o tamanho crítico do defeito utilizando a Equação 5. No cálculo, foram utilizados: A tensão fletora correspondente ao pico do ciclo de maior amplitude resultante da passagem dos quatro eixos de dois vagões adjacentes com carregamento vertical de 33 toneladas por eixo (por ser esse, um valor típico para ferrovias do tipo *heavy haul*), lateral igual à metade do vertical (o que representa os esforços em uma curva fechada), rigidez da base elástica (K_v) de 20,7 MPa, Ma em função do nível de desgaste e σ , correspondentes ao defeito crítico. O carregamento estático da roda foi

amplificado por um *DLF* (fator dinâmico de carregamento) igual a 1,42, correspondente a uma velocidade de 65 km/h e rodas com diâmetro de 80 cm. A tensão fletora foi multiplicada pelo *Mg* (fator de amplificação do gradiente de tensões) utilizando-se para a mesma relação de carregamento lateral/vertical. Para a tensão térmica foram assumidas: uma *TN* (temperatura neutra) de 28 C e *T* (temperatura de trabalho) de 12, 15 e 18 C por serem comuns em algumas das principais ferrovias *heavy haul* do Brasil. O ciclo com maior amplitude, bem como a relação lateral-vertical de carregamento utilizados na determinação da tensão fletora e do tamanho crítico de defeito, foram escolhidos de modo a superestimar o carregamento, possibilitando a obtenção de um tamanho de defeito crítico menor, e conseqüentemente, ma maior segurança na previsão. Os cálculos foram feitos para tamanhos iniciais do defeito de: 10, 15 e 20% de *HA* e nível de desgaste de 10% de *HA*.

As tensões máximas e mínimas para crescimento de defeitos, foram calculadas pela superposição das tensões térmicas e residuais com a tensão fletora máxima e mínima dos ciclos respectivamente, e modificadas por dois fatores: (1) o fator de amplificação do gradiente de tensões, (*Mg*) que depende do tamanho do defeito e da relação de carregamento lateral-para-vertical da roda de 0,05 correspondente a uma curva tangente (predominância de linhas retas). (2) um fator dinâmico de carregamento (*DLF*) igual a 1,42 (o mesmo usado no cálculo do tamanho crítico).

Para o cálculo da vida remanescente, utilizou-se a Equação 8 com um *CP* igual a 132 toneladas, correspondente a passagem de quatro eixos com carregamento vertical de 33 toneladas cada. Utilizou-se também, uma tonelagem bruta diária, *TD* de 178000 toneladas correspondente a 65×10^6 MTB, sendo 50 milhões de minério mais o peso do vagão.

Com objetivo de ver a influência que tamanhos críticos correspondentes a diferentes temperaturas de trabalho (ambiente) poderiam causar no tempo de crescimento estável, foram então calculados as vidas remanescentes para os tamanhos críticos correspondentes as temperaturas de 12, 15 e 18 C.

RESULTADOS

A Tabela 2 lista os tamanhos críticos de defeitos em % de *HA* para ambos os fabricantes com nível de desgaste igual a 10% de *HA* e com diferentes temperaturas de trabalho.

Tabela 2. Listagem dos tamanhos críticos em % de *HA*, para diferentes temperaturas, X de 10% *HA*.

Temperatura de Trabalho (C)	Fabricante A	Fabricante B
12	27,4	30,5
14	28,2	31,3
16	29,1	32,2
18	30,1	33,1

A Tabela 3 mostra a influência que tamanhos críticos correspondente a diferentes temperaturas de trabalho (ambiente) causam na vida remanescente.

Tabela 3. Listagem do tempo de crescimento seguro (em dias), para trilhos com defeitos de 10% de *HA*, nível de desgaste de 10% de *HA* e tamanhos críticos correspondentes a diferentes temperaturas de trabalho.

Temperatura de Trabalho (°C)	Fabricante A	Fabricante B
12	25,6	29,1
15	33,2	39,3
18	43,1	45,9

A Figura 3 mostra a influência da Temperatura na vida remanescente do trilho do Fabricante A e do Fabricante B. Como pode-se observar, a vida remanescente aumenta com o aumento da Temperatura de Trabalho para ambos os materiais. O material do Fabricante A apresenta em média uma vida remanescente menor decorrente de sua maior taxa de propagação.

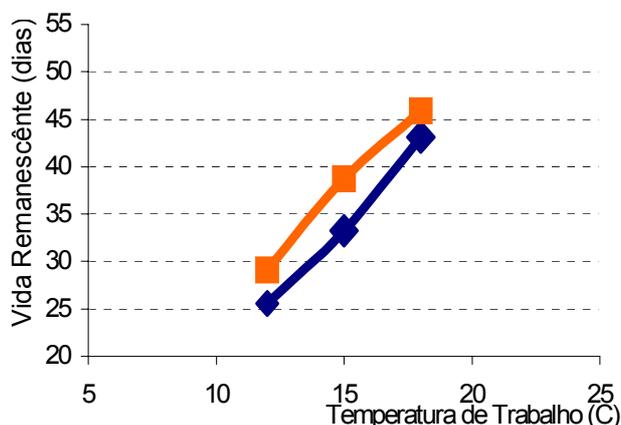


Figura 3. Influência da Temperatura de Trabalho na vida remanescente do trilho do Fabricante A (linha inferior) e do Fabricante B (linha superior).

DISCUSSÃO

A vida remanescente calculada a partir de tamanhos críticos correspondentes a diferentes temperaturas mostrou haver uma considerável diferença no tempo de crescimento estável em dias. Se por exemplo para um trilho do Fabricante A com tamanho inicial de defeito de 10% de *HA* e nível de desgaste também de 10% de *HA*, a vida remanescente é de 33 dias para o tamanho crítico referente a uma temperatura de trabalho de 15 C, para temperaturas de 12 e de 18 C são 25 e de 43 dias respectivamente. Ou, se nas mesmas condições, o trilho for do Fabricante B, a vida remanescente passa a ser de 39 dias para o tamanho crítico referente a uma temperatura de trabalho de 15 C e de 29 e 46 dias para temperaturas de 12 e de 18 C respectivamente.

Estratégias de inspeção podem ser desenvolvidas acompanhando-se o crescimento de defeitos em diferentes épocas do ano, a fim de obter, um aumento

ainda maior no potencial de utilização do carro detector. Assim, a avaliação da influência de épocas mais chuvosas e variações na temperatura durante o ano na taxa de propagação dos defeitos, permitiria estabelecer tempos em dias para atraso ou adiantamento nos intervalos de inspeção. Nos cálculos feitos nesse trabalho é feita uma aproximação por considerar a temperatura de trabalho constante, sendo que certamente os aquecimentos e resfriamentos devem afetar o desempenho dos trilhos em serviço. Uma avaliação sobre o risco e benefício do atraso na inspeção de trilhos foi analisada por *Orringer et. al.* em *Risk/Benefit Assessment of Delayed Action Concept for Rail Inspection.*⁽¹³⁾

CONCLUSÃO

Quanto mais elevada a Temperatura de trabalho, maior é a sua influencia no tamanho crítico do defeito e principalmente no tempo de crescimento seguro do mesmo, ou seja, maior será o tamanho crítico e menor será a taxa de crescimento do defeito.

Intervalos de inspeção de tolerância ao dano podem ser estabelecidos baseados nos resultados obtidos. Estratégias podem ser desenvolvidas acompanhando-se o crescimento de defeitos em diferentes épocas do ano e avaliando a influência de épocas mais chuvosas e variações na temperatura durante o ano na taxa de propagação dos defeitos. Assim, poderiam ser definidos tempos em dias com precisão para atraso ou adiantamento nos intervalos de inspeção.

Agradecimentos

À Capes e ao CNPq pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 **1 JEONG, D. Y. Damage tolerance analyses of detail fractures in rail, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 28, p. 109-115, 1997.**
- 2 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.
- 3 HETENYI, M. **Beams on Elastic Foundation**, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1983.
- 4 TIMOSHENKO, A., LANGER, B. F., **Stresses in Railroad Track**, ASME Trans. 54 1932.
- 5 ORRINGER, O. **Detail Fracture Growth in Rails: Test Results**, 1986.
- 6 SCHNEIDER, E. L. **Análise da Vida Remanescente de Trilhos com Defeitos Transversais Desgastados em Serviço.** Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFRGS, 2005.
- 7 CLAYTON, P., TANG Y.H. **Detail Fracture Growth in Curved Track at the Facility for Accelerated Service Testing. Residual Stresses in Rails, Vol. 1, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1992.**
- 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 TADA, H., PARIS, P. e IRWIN, G. **The Stress Analysis of Cracks Handbook.** 2nd edition, Paris Productions, 1985.
- 10 ROOKE, D.P., e CARTWRIGHT, D.J. **Compendium of Stress Intensity Factors.** United Kingdom: HM Stationery Office, 1976.
- 11 SHAH, R.C., KOBAYASHI, A.S. **Stress Intensity Factor for an Elliptical Crack under Arbitrary Normal Loading** in Engineering Fracture Mechanics 3:71-96, 1971.
- 12 ORRINGER, O. **Detail Fracture Growth in Rails: Test Results**, 1986.
- 13 ORRINGER O. **Risk/Benefit Assessment of Delayed Action Concept for Rail Inspection.** DOT/FRA/ORD-99/03, 1999.