

MECÂNICA DE FRATURA APLICADA NA PREDIÇÃO DA VIDA EM FADIGA DE TRILHOS FERROVIÁRIOS¹

Ana Carolina Rodrigues da Rocha²
Thompson Júnior Ávila Reis³
Luciano José Vieira Franco⁴
Cássio Roberto de Araújo⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho foi determinar a vida remanescente em fadiga de trilhos ferroviários aplicando os fundamentos da mecânica de fratura. Para tal, foram utilizados resultados de ensaios não destrutivos de ultrassonografia que indicaram a presença de trincas internas com tamanho definido em quatro situações diferentes. Estes ensaios foram realizados em trilhos da malha ferroviária de uma empresa do setor logístico que atua na região sudeste do Brasil. As informações referentes às propriedades de fadiga como a taxa de propagação de trinca (da/dN), resistência à propagação de trinca e o estado de tensões que se desenvolvem em trilhos foram obtidos da literatura. Com estes dados foram determinados o tamanho crítico de trinca que precede a fratura final e o número de ciclos que os segmentos de trilho ainda suportam antes de entrar em colapso. Foi proposta uma metodologia baseada no dimensionamento das composições para determinar a vida em fadiga dos trilhos em função do fluxo a qual está submetido. Os Resultados são úteis para o planejamento de inspeções preventivas de forma eficiente uma vez que não se baseariam em intervalos temporais, mas sim no fluxo de veículos na qual a linha está submetida.

Palavras-chave: Mecânica de fratura; Fadiga; Trilho ferroviário; Curva $da/dN-\Delta K$.

FRACTURE MECHANICS APPLIED TO PREDICT THE FATIGUE LIFE OF RAILROAD RAILS

Abstract

The aim of this work piece was to determine the remaining life of railroad rails under fatigue applying the fundamentals of fracture mechanics. For this purpose were used results of nondestructive ultrasounds testing that indicated the presence of internal cracks with defined size in four different situations. These tests were performed on rails of a railway company that operates the logistic sector in southeastern Brazil. Information concerning the fatigue properties with the rate of crack propagation (da/dN), strength crack propagation and the stress state that develops in rails were obtained from literature. With these dates were determined the critical size of the crack preceding the final fracture and the number of cycles that the segment of rails still supports before collapse. It was proposed a methodology based on the dimensioning of the compositions to determine the fatigue life of the rails as a function of the flow which it is subject. The results are useful to the planning of preventative inspections efficiently since would not be based on time intervals, but the flow of vehicles in which the railway is subject.

Keywords: Fracture mechanics; Fatigue; Railroad rail; $da/dN-\Delta K$ curve.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Graduando em Engenharia de Produção – Faculdade Presidente Antônio Carlos Conselheiro Lafaiete (UNIPAC)

³ Mestrando em Engenharia dos Materiais – Faculdade Presidente Antônio Carlos Conselheiro Lafaiete (UNIPAC)/Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

⁴ Mestre em Educação - Faculdade Presidente Antônio Carlos Conselheiro Lafaiete (UNIPAC)

⁵ Mestre em Engenharia dos Materiais - Faculdade Presidente Antônio Carlos Conselheiro Lafaiete (UNIPAC)

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário é um dos meios mais eficientes e econômicos que existe para realizar movimentações de grandes volumes de cargas a grandes distâncias.⁽¹⁾ O Brasil possui três das mais importantes malhas ferroviárias do mundo. Estas são empregadas principalmente no transporte de minério de ferro das regiões em que é explorado para siderúrgicas ou para portos marítimos.⁽²⁾

Para que o transporte ferroviário seja eficiente é importante, entre outras coisas, garantir a integridade das ferrovias. Falhas em trilhos durante a passagem de composições pode levar a acidentes com perdas de vidas humanas e de bens materiais de grande vulto.⁽²⁾

A solicitação mecânica imposta aos trilhos no momento em que as composições trafegam sobre eles é cíclica. Condição que, se combinada com tensões de tração e com deformação plástica localizada leva à degradação do trilho por fadiga. Fenômeno este que pode culminar na nucleação e no crescimento de trincas até um tamanho tal que a área remanescente do componente não suporta mais a solicitação mecânica e falha de maneira catastrófica.⁽³⁾

Registros sobre as falhas mais comuns em trilhos indicam que muitos problemas ocorrem devido à nucleação e crescimento de trincas transversais de fadiga no boleto do trilho. A base do trilho (patin) está sempre sob condição de carregamento de tração. Situação que descarta o estado de tensões cíclicas nesta região. Enquanto que na alma do trilho o estado de tensões é tão baixo que se torna raro o surgimento de trincas nesta região.^(1,2,4,5)

Quanto ao mecanismo de nucleação de trincas Rice⁽⁶⁾ afirma que trincas por fadiga normalmente não nucleiam na superfície do boleto do trilho como acontece na maioria dos componentes mecânicos que sofrem este tipo de degradação. Isto porque o contato das rodas dos vagões e locomotivas com a superfície do boleto o deforma plasticamente e conseqüentemente encrua esta região. Esta deformação plástica induz tensões residuais de compressão na superfície do boleto que impedem o surgimento de trincas por fadiga. Conseqüentemente, o mecanismo de nucleação de trincas por fadiga no boleto, em muitos casos, não está relacionado a condições superficiais ou geométricas, como ranhuras ou concentradores de tensões. Este estágio do fenômeno de fadiga é dependente das condições metalúrgicas do trilho como inclusões não metálicas ou descontinuidades microestruturais que se encontram no interior do boleto.^(2,3,7) Condição esta que deve ser controlada durante o processo de fabricação do trilho.

A evolução dos processos siderúrgicos para se obter aços com maior índice de pureza e o surgimento de novas ligas^(8,9) mais resistentes mecanicamente diminuem o número de falhas em trilhos devido à degradação por fadiga, mas não resolvem o problema completamente. Então inspeções preventivas e análise de falhas⁽¹⁰⁾ se fazem necessárias para detectar e acompanhar a evolução de trincas de fadiga e entender melhor os mecanismos de falha em vias férreas. Até pouco tempo atrás ações simplistas como a substituição de segmentos de trilhos no momento em que se detectava uma trinca eram comumente adotadas por equipes de manutenção de grandes ferrovias.⁽²⁾ Medida que reflete no dispêndio de recursos uma vez que a presença de trincas não significa que o componente está desqualificado para o uso.

Atualmente, estão disponíveis recursos avançados como os fundamentos da mecânica de fratura que tem por objetivo dar respostas quantitativas para problemas específicos relacionados com a presença de trincas em componentes sujeitos a tensões. Estes métodos permitem evitar falhas em componentes com defeitos

porque mantém sob controle o crescimento de trincas, propiciando uma propagação de tal forma que o tamanho do defeito não alcance o valor crítico antes de uma inspeção programada ou a troca do componente.^(2,11)

Diversos trabalhos têm sido realizados por pesquisadores que buscam modelos matemáticos baseados na mecânica de fratura. A expectativa é que estes modelos matemáticos possam prever com precisão e segurança qual a vida remanescente de trilhos que já possuem defeitos em sua estrutura. Dentre estes trabalhos pode-se citar o de Plu et al.⁽¹²⁾ que tiveram por objetivo demonstrar a aplicação da mecânica de fratura para predição da vida remanescente de trilhos de ferrovias para transporte de pessoas em altas velocidades. O trabalho de Dang Van et al.⁽¹³⁾ que apresentaram as principais etapas para o modelamento e acompanhamento de defeitos em trilhos de ferrovias de alta velocidade. Além da pesquisa de Fletcher, Smith e Kapoor⁽¹⁴⁾ que apresentaram um novo modelo matemático baseado na mecânica de fratura para o acompanhamento da evolução de trincas em trilhos que leva em conta o efeito da fricção da roda no trilho no processo de degradação por fadiga.

Dentro desta ótica o acompanhamento da evolução da degradação por fadiga de trilhos ferroviários se caracteriza como uma ação que objetiva garantir a integridade da via. O objetivo deste trabalho é determinar a vida em fadiga de trilhos ferroviários que apresentam trincas transversais de fadiga em diferentes níveis de evolução empregando-se os fundamentos da mecânica de fratura. E demonstrar também que é possível planejar atividades de inspeção baseada no estágio de degradação da via através dos resultados obtidos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O ponto de partida para o desenvolvimento deste trabalho foram resultados de ensaios de ultrassonografia que indicaram a presença de trincas transversais em trilhos. Estes ensaios são realizados rotineiramente na malha ferroviária de uma empresa do setor logístico que atua na região sudeste do Brasil. Segundo Limberger⁽²⁾ as técnicas para realização de ensaios de ultrassom em ferrovias são completamente dominadas pelas equipes de manutenção destas empresas já há vários anos.

Os tamanhos de trincas obtidos nas inspeções caracterizam o estado atual de degradação dos trilhos. Para determinar a vida remanescente destes trilhos ou o número de ciclos que eles ainda suportam antes de falhar foi preciso conhecer também os níveis de tensões cíclicas na qual estão submetidos, a tenacidade à fratura do material utilizado na fabricação do trilho e a curva da taxa de propagação de trinca (da/dN) versus a amplitude de intensidade de tensões (ΔK). E determinar também o fator de proporcionalidade relacionado à geometria e dimensões da trinca e do trilho (Y) e o comprimento crítico da trinca (a_c).

2.1 Características dos Trilhos

Os trilhos empregados na construção das ferrovias brasileiras são os do tipo *Vignole* TR-68. A Figura 1 ilustra o perfil e as dimensões em centímetros deste trilho. Estes trilhos foram fornecidos tanto por empresas européias como o EN 13674-1 grau 260 quanto pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) como é o caso do Niobras-200.^(1,2) Os trilhos EN 13674-1 grau 260 são fabricados em aço com teor de carbono variando entre 0,6% e 0,82% em peso percentual e o Niobras-200 em aço

com teores de carbono entre 0,72% e 0,82% e de nióbio na faixa de 0,03% ambos em peso percentual. O objetivo do nióbio nesta liga é induzir à formação de uma estrutura perlítica com finas lamelas.⁽²⁾ Estes trilhos possuem estrutura constituída exclusivamente de perlita uma vez que são aços eutetóides. Mais recentemente, trilhos produzidos em aços baixo carbono e posteriormente tratados termicamente para obter estrutura martensítica ou bainítica vêm sendo empregados, bem como trilhos com alto teor de carbono (0,9%pC) com estrutura constituída de cementita e perlita.^(2,8)

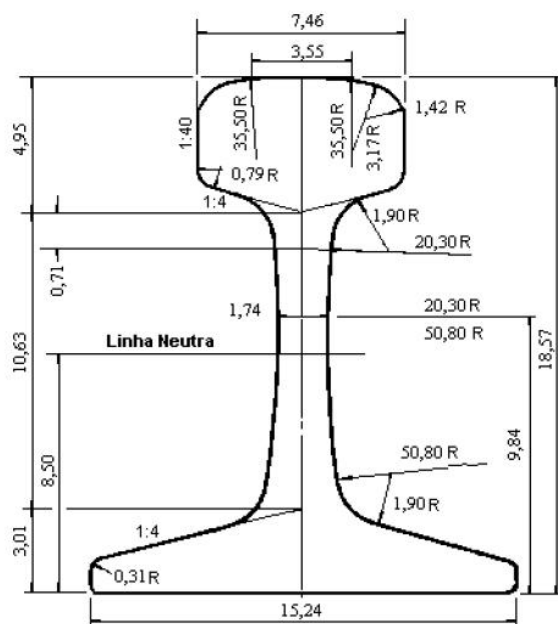


Figura 1. Perfil do trilho TR-68, dimensões em centímetros.⁽¹⁾

2.2 Estado de Tensões dos Trilhos

Mesmo quando não há tráfego de composições sobre os trilhos um complexo estado de tensões triaxiais está atuando sobre ele. Estas tensões são chamadas tensões residuais. No que diz respeito à degradação por fadiga mediante o crescimento de trincas transversais, as tensões longitudinais são aquelas que irão promover a abertura e o fechamento cíclico destas trincas e por este motivo são as tensões de interesse neste trabalho.

De acordo com Schneider⁽¹⁾ e Limberger⁽²⁾ trilhos continuamente soldados são montados intencionalmente sob tensões de tração longitudinal para garantir o alinhamento da via. Além disso, flutuações na temperatura ambiente induzem tensões térmicas que alteram o nível de tensões tratativas impostas aos trilhos pela dilatação e contração dos mesmos. Independentemente da via ser continuamente soldada ou não, segundo Limberger⁽²⁾ e Rice⁽⁶⁾ os trilhos estão submetidos a um estado de tensões residuais de tração. Isto pelo fato do boleto sofrer deformação plástica superficial devido às intensas cargas de compressão impostas pelas rodas dos vagões. A deformação plástica da superfície induz tensões de compressão nesta região. O material no interior do trilho restringe a deformação plástica na camada superficial e por este motivo fica submetido a um estado de tensões residuais de tração. Quando ocorre o tráfego de composições sobre os trilhos, cada roda que passa sobre um ponto no trilho o flexiona como se fosse uma viga, induzindo tensões de tração no patin e de compressão no boleto. O que caracteriza

um estado de tensões cíclicas no boleto. A Figura 2 ilustra o mapeamento de tensões residuais e das tensões impostas pela passagem de uma roda de vagão sobre um ponto no trilho apresentados por Rice.⁽⁶⁾ Ambas as tensões no sentido longitudinal do trilho.

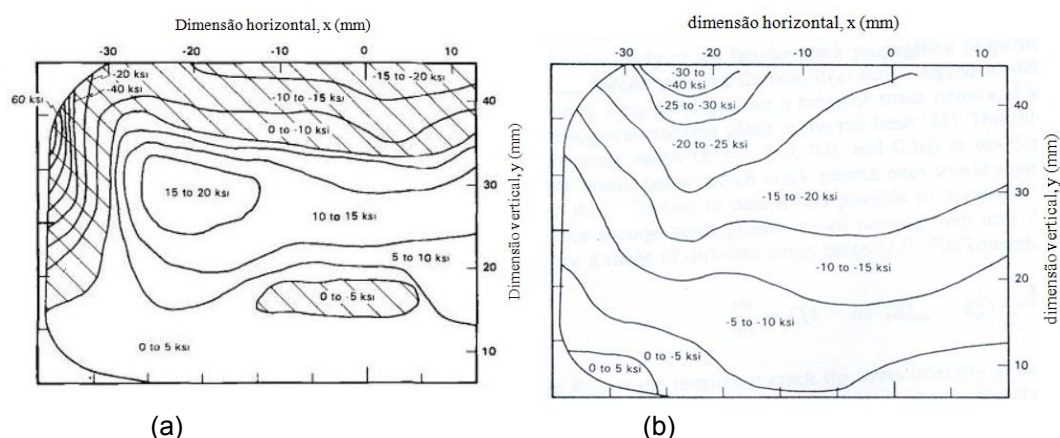


Figura 2. Estado de tensões longitudinais em ksi que se desenvolvem em um trilho (a) tensões residuais (b) tensões impostas pela passagem de uma roda com carga de 133kN.⁽⁶⁾

Como pode ser observado na Figura 2a, tensões residuais de tração da ordem de aproximadamente 138 MPa (20ksi) estão presentes em um ponto a 20 mm à esquerda do eixo vertical e a 30 mm acima do eixo horizontal. No instante em que ocorre a passagem de uma roda sobre este ponto, tensões de compressão com magnitude similar se desenvolvem no mesmo local (Figura 2b), caracterizando assim um estado cíclico de tensões. Esta condição foi escolhida para ser considerada como o estado de tensões cíclicas impostas aos trilhos estudados neste trabalho. Esta escolha leva em conta também o nível de carregamento considerado pela passagem de uma roda de vagão de 133 kN, o que equivale a um vagão de aproximadamente 104 ton, peso aproximado ao de um vagão de minério com 120 ton. É importante considerar também que as diferentes distâncias entre as rodas de um mesmo vagão e entre vagões adjacentes implicam em um espectro de carregamento complexo, como esta ilustrado na Figura 3.

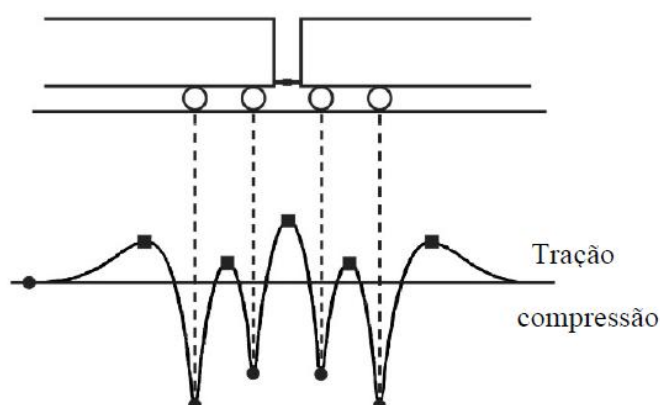


Figura 3. Esquema referente ao ciclo de tensões produzido pela passagem de dois vagões.⁽¹⁾

Como pode ser observado na Figura 3 há uma variação nas magnitudes das tensões compressivas e trativas. Também ocorre variação no período de cada ciclo

devido às diferentes distâncias entre os eixos. Neste trabalho estas variações foram desprezadas para facilitar a realização dos cálculos.

2.3 Tenacidade à Fratura

Neste trabalho foi considerado o valor de tenacidade à fratura apresentado por Rice⁽⁶⁾ igual a $60,4 \text{ MPa m}^{1/2}$. Utilizando os parâmetros considerados por Limberger⁽²⁾ para determinação da tenacidade à fratura foi possível estimar o valor de Y referente às dimensões e forma tanto do defeito quanto do trilho. Os ensaios realizados por Limberger⁽²⁾ para determinação da tenacidade à fratura foram realizados em segmentos entalhados de trilhos Niobras-200 submetidos à flexão a três pontos. Sendo os trilhos extraídos da ferrovia após aproximadamente 20 anos de utilização.⁽²⁾ O valor de Y foi determinado igual a 1,03.

2.4 Taxa de Propagação de Trinca

Quanto à taxa de propagação de trinca foi considerado a curva da/dN versus ΔK apresentada no trabalho de Rice.⁽⁶⁾ A Figura 4 ilustra curvas da/dN versus ΔK para diferentes razões (R) entre tensões mínimas e máximas.

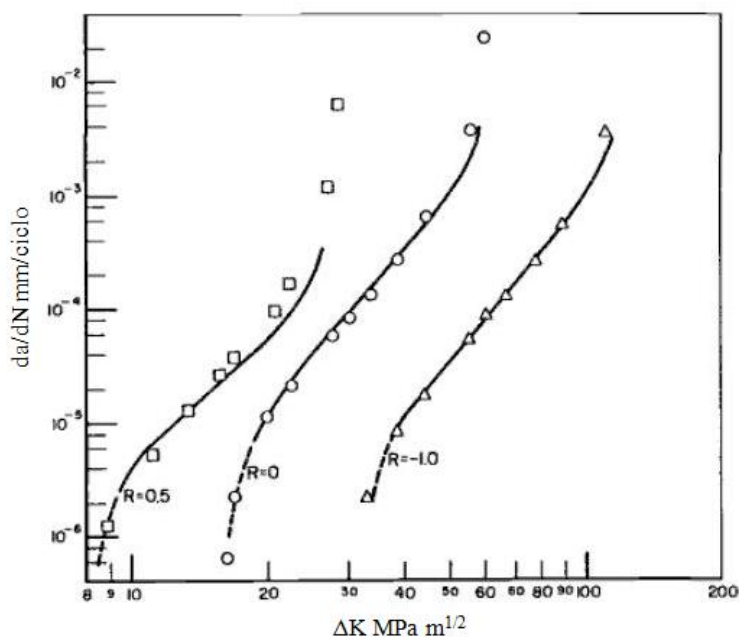


Figura 4. Taxas de propagação de trinca transversais em trilhos com razões R iguais a 0,5; 0 e -1.⁽⁶⁾

2.5 Cálculo da Vida em Fadiga dos Trilhos

Para a realização dos cálculos da vida remanescente dos trilhos considerados neste trabalho, primeiramente foi determinado o tamanho crítico de trinca a partir do desenvolvimento da Equação 1.⁽¹⁵⁾

$$K_{Ic} = Y(a/w)\sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

Onde K_{Ic} é a tenacidade à fratura, σ_c é a tensão na qual o componente está submetido e a é o comprimento da trinca. De posse dos valores dos tamanhos inicial

e final da trinca e do carregamento flutuante do trilho calculou-se a vida remanescente dos mesmos a partir da integração da Equação de Paris⁽¹⁵⁾ (Equação 2).

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (2)$$

Onde A e m são constantes referentes ao material e ΔK é a amplitude de intensidade de tensões na ponta da trinca expresso pela Equação 3.⁽¹⁵⁾

$$\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

Para determinar os valores das constantes A e m da Equação de Paris foram tomados dois pontos na curva da/dN versus ΔK . A curva de taxa de propagação de trinca usada para este fim foi a de razão R = -1 (Figura 4) uma vez que foi proposto carregamento cíclico completamente reverso (tensão média igual a zero) com amplitude de tensão igual a 138MPa. Apesar do estado de tensões escolhido envolver tensões compressivas, estas não contribuem com a abertura da trinca e, portanto, não são consideradas nos cálculos para a determinação do valor de ΔK e da vida remanescente dos trilhos.^(1,2,6,15)

3 RESULTADOS

Os resultados de ultrassom realizados nos trilhos da malha ferroviária citada acima indicaram trincas transversais em quatro pontos distintos sendo que as áreas destas trincas foram determinadas com valores de 30 mm², 40 mm², 60 mm² e 120 mm².

Utilizando-se os valores da tenacidade à fratura e do fator de proporcionalidade relacionado à forma e dimensão da trinca e do trilho (Y) foi determinado o tamanho crítico de trinca (a_c) igual a 28,6 mm. Conforme relatado por Limberger,⁽²⁾ para fins de simplificação de cálculo a trinca pode ser considerada circular ao invés de elíptica como normalmente ocorre. E por se tratar de uma trinca interna o valor de a_c se refere ao raio da trinca.

A partir da curva da taxa de crescimento de trinca apresentado na Figura 4 para o valor de R=-1 obteve-se os valores de A e m da Equação de Paris. Sendo determinado que A é igual a $1,16 \times 10^{-13}$ e m igual a 4,97.

De posse de todos os valores mencionados acima foi determinado a vida remanescente para os trilhos com os defeitos internos também mencionados a partir da integração da Equação de Paris (Equação 4).

$$N = \frac{1}{1,485 A \pi^{m/2} (\Delta\sigma)^m Y^m} \left(\frac{1}{a_0^{1,485}} - \frac{1}{a_c^{1,485}} \right) \quad (4)$$

Os resultados dos cálculos estão expressos na Tabela 1. A última coluna da Tabela 1 apresenta a vida em fadiga dos trilhos baseada no número de composições que trafega sobre eles. Estas composições foram dimensionadas considerando que cada uma é composta por 120 vagões de quatro eixos cada e cinco locomotivas de seis eixos cada. Cada composição que trafega sobre um ponto no trilho lhe impõe um número de ciclos igual a 510 ciclos. Assim, pela divisão do número de ciclos até

a falha por 510, temos o número de composições que ainda poderia trafegar sobre os vagões.

Tabela 1. Número de ciclos até a falha obtidos para trilhos com diferentes tamanhos de trincas

Área da trinca inicial (mm ²)	Raio da trinca inicial (mm)	Nº de ciclos até a falha (N)	Nº de composições até a falha (N _c)
30	3,09	34.719	68
40	3,57	27.763	54
60	4,37	20.218	39
120	6,18	11.553	22

A Figura 5 ilustra um gráfico que relaciona a área do defeito encontrado no trilho com o número de composições que poderia trafegar sobre ele.

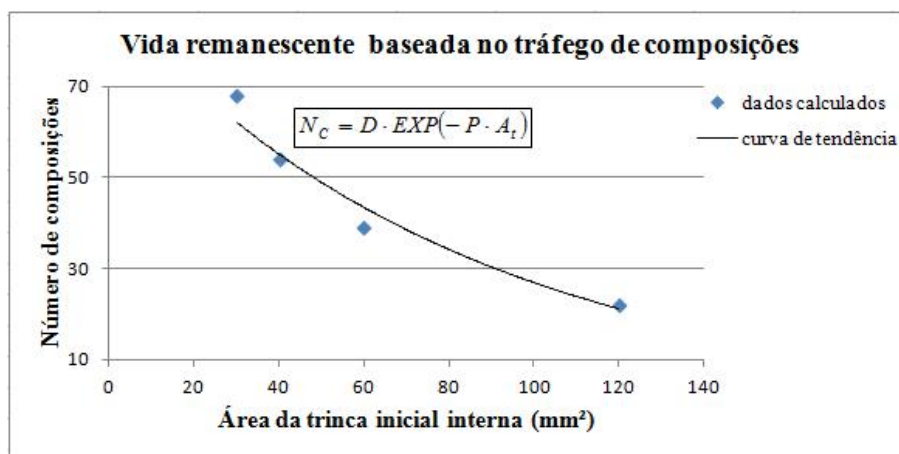


Figura 5. Relação entre a área da trinca transversal com a vida em fadiga por número de composições.

Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 5 a vida em fadiga do trilho decresce à medida que a área da trinca interna do trilho aumenta. A linha de tendência apresentada no gráfico da Figura 5 para os resultados obtidos é expressa matematicamente por uma relação exponencial existente entre a vida em fadiga e a área da trinca. Portanto, é possível estimar a vida em fadiga de trilhos que apresentam defeitos transversais internos quando a área do defeito está compreendida entre 30 e 120mm² a partir da Equação 5.

$$N_c = D \cdot \text{EXP}(-P \cdot A_t) \quad (5)$$

Onde N_c é o número de composições que ainda poderia trafegar sobre o trilho com defeito considerando o dimensionamento para cada composição apresentado anteriormente. D e P são constantes referentes à resistência do material à propagação de trinca. Para as condições consideradas aqui os valores encontrados para D e P foram de 88,974 e -0,012, respectivamente. E, por último, A_t que representa a área da trinca transversal interna em milímetros quadrados. Utilizando a Equação 5 é possível planejar adequadamente a rotina de inspeções em trilhos para acompanhar a evolução dos defeitos já encontrados considerando o fluxo de composições que trafega sobre o trilho. Esta metodologia pode ser mais eficiente que metodologias onde o intervalo entre as inspeções é periódico uma vez que,

inspeções desnecessárias não precisariam ser realizadas já que a vida útil do trilho esta fixada a partir do tráfego que lhe será imposto.

4 DISCUSSÃO

Para a obtenção de resultados com considerável grau de precisão é necessário levar em conta uma série de fatores que neste trabalho foram desprezados. Entre eles pode-se citar o nível de desgaste dos trilhos conforme foi estudado por Schneider.⁽¹⁾ Também é importante considerar a liga em que o trilho foi produzido e sua estrutura resultante,^(8,12) além do nível de descontinuidades estruturais como inclusões não metálicas, conforme foi apontado por Limberger.⁽²⁾ Os efeitos causados pelo contato entre roda e trilho conforme é apontado por Fletcher, Smith e Kapoor.⁽¹⁴⁾ Além do espectro de tensões cíclicas, a presença de outros tipos de defeitos combinados com as trincas transversais como trincas do tipo *shelling*. A forma e a posição do defeito no interior do trilho. O ambiente em que a via férrea esta instalada, se existe agentes corrosivos presentes. As formas da via se são pontos em curva ou não, se há declive ou aclive. A velocidade em que as composições trafegam. Todos estes fatores contribuem positiva ou negativamente com a vida em fadiga do trilho.

Mas, apesar das simplificações consideradas neste trabalho, os resultados obtidos são bastante consistentes. Quanto ao tamanho crítico de trinca (a_c) o valor encontrado de 28,6 mm representa uma trinca com área de aproximadamente 76,8% da área total do boleto. Valor este relativamente maior que os valores obtidos por outros autores. A melhor condição obtida por Schneider⁽¹⁾ quanto ao tamanho crítico de defeito foi com área de 41,2% da área do boleto. Isto somente para um dos trilhos que ele estudou e com nível zero de desgaste do boleto. Apesar disto, o resultado obtido para o tamanho crítico de trinca pode ser justificado levando em conta que, de acordo com Rice⁽⁶⁾ trincas transversais podem atingir dimensões superiores à 50% da área do boleto sem que possam ser identificadas à olho nu. A Figura 6 ilustra a fratura de um trilho causada pela nucleação e crescimento de uma trinca transversal.

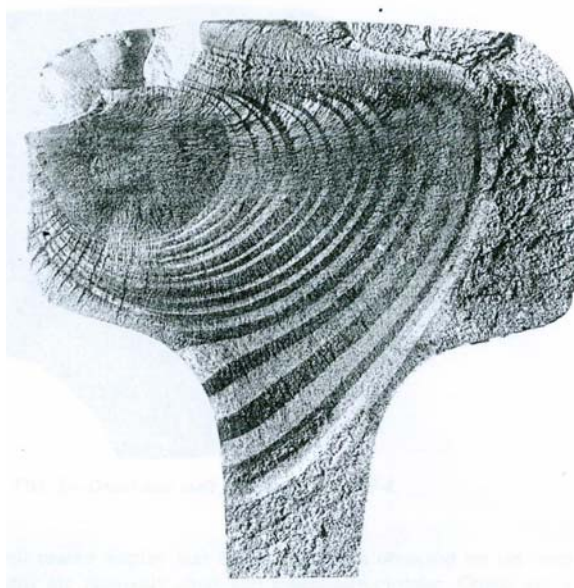


Figura 6. Trinca transversal em trilho.⁽⁶⁾

Conforme pode ser observado na Figura 6 a área de crescimento estável da trinca é visivelmente maior que a metade da área total do boleto. O fato do trilho ainda suportar o carregamento imposto pela passagem das composições contando com menos da metade da área do boleto é devido ao nível de carregamento imposto ser muito inferior ao limite de resistência à tração do material. Os aços empregados na construção de trilhos normalmente possuem limite de resistência à tração da ordem de 1.000 MPa enquanto que aqui está sendo considerado um carregamento cíclico com tensão máxima igual a 138 MPa. O que equivale a menos de 15% do limite de resistência à tração do material. O trilho ilustrado na Figura 6 foi extraído da ferrovia com a trinca transversal iniciada. A continuidade da propagação da trinca até a ruptura do segmento foi realizada em ensaios laboratoriais que simulam as condições reais de carregamento.

Quanto aos resultados obtidos para as vidas remanescentes dos trilhos variando entre 11.000 ciclos e 35.000 ciclos. Estes são conservadores se for considerado que um tráfego de aproximadamente 20 composições pode ocorrer em poucos dias dependendo do fluxo existente na via. No entanto, Stephens et al.⁽¹⁶⁾ explicam que o processo de degradação por fadiga se divide em dois estágios. O estágio de nucleação e o estágio de crescimento estável da trinca, sendo a vida em fadiga encerrada no momento em que ocorre a fratura final. Quando se fala em vida em fadiga, normalmente não se faz distinção entre a fração da vida necessária para nuclear a trinca e a fração necessária para promover o seu crescimento. Stephens et al.⁽¹⁶⁾ afirmam que, se for considerado uma dimensão específica para o comprimento de uma pequena trinca como sendo a dimensão em que ocorre a transição entre os estágios de nucleação e crescimento pode-se obter uma curva que expressa o número de ciclos necessários para nuclear uma trinca em função do nível de carregamento aplicado. Conforme está ilustrado na Figura 7.

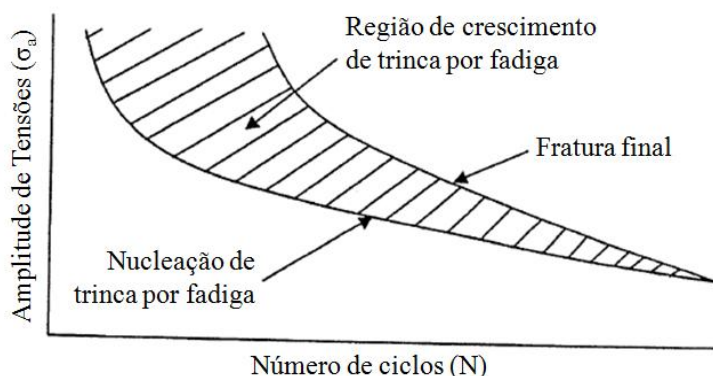


Figura 7. Curva de Wöhler esquemática para a vida de nucleação de trinca e a vida de crescimento de trinca até a fratura final.⁽¹⁶⁾

A Figura 7 mostra que o número de ciclos necessários para nuclear uma trinca varia de um pequeno percentual até quase a totalidade da vida em fadiga dependendo do nível de carregamento na qual o componente está sendo submetido.⁽¹⁶⁾ Para o caso dos trilhos o comportamento em fadiga pode ser classificado como fadiga de alto ciclo. Situação esta em que boa parte da vida em fadiga é consumida no estágio de nucleação de trincas. E, à medida que uma trinca nucleia, um número relativamente pequeno de ciclos é necessário para que esta trinca atinja o tamanho crítico. Considerações estas que justificam os resultados obtidos.

Se a ferrovia é utilizada para o transporte de materiais específicos como é o caso do transporte de minério de ferro, a vida em fadiga baseada no número de composições se torna bastante adequada. Ainda mais se for levado em conta a possibilidade de relacionar vida em fadiga de trilhos com número de composições em tráfego conforme foi proposto. Esta condição permite o acompanhamento mais eficiente dos defeitos encontrados na ferrovia. O planejamento eficiente das atividades de inspeção e manutenção implica na redução de custos e de interrupções das atividades por impossibilidade de utilização da via.

5 CONCLUSÃO

A partir da utilização dos fundamentos da mecânica de fratura foi possível apresentar valores coerentes para a vida remanescente de trilhos ferroviários que possuem trincas transversais no seu interior. Mesmo considerando algumas simplificações, o volume de informações coletados na literatura sobre fadiga de trilhos foi suficiente para a determinação de um tamanho crítico de trinca coerente com resultados publicados por outros autores como é o caso dos resultados apresentados por Rice.⁽⁶⁾

Os resultados para a vida remanescente em fadiga se apresentaram conservadores uma vez que os números de ciclos até as falhas encontrados podem ser alcançados em poucos dias dependendo do tráfego imposto à via. Mas a literatura mostra que estes valores são coerentes. Isto devido ao fato de que trilhos ferroviários trabalham sob baixo nível de carregamento se comparado ao limite de escoamento do material em que é fabricado. O resultado disto é uma vida em fadiga de alto ciclo, condição em que quase a totalidade do número de ciclos até a falha é gasto no estágio de nucleação de trincas, como pode ser observado na Figura 7. Deste modo, constata-se que praticamente toda a vida em fadiga do trilho já foi consumida a partir do momento em que se detecta uma trinca, restando somente uma pequena fração de ciclos necessários para que esta trinca cresça até atingir o tamanho crítico e levar o trilho ao colapso.

Foi possível relacionar o fluxo de composições com a vida remanescente dos trilhos a partir da fixação da dimensão de cada composição. Foi proposta uma relação matemática que expressa esta relação. Recurso este que pode ser útil para o planejamento eficiente de novas inspeções para acompanhar a evolução dos defeitos e também para o planejamento de manutenções de forma a minimizar as interrupções na utilização da via.

Agradecimentos

O autor Thompson Júnior Ávila Reis agradece ao CNPQ e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pelo apoio financeiro, agradece à Faculdade Presidente Antônio Carlos em Conselheiro Lafaiete (UNIPAC) e a empresa MRS Logística S. A. pelo apoio. Os autores Cássio Roberto de Araujo e Luciano José Vieira Franco e a autora Ana Carolina Rodrigues da Rocha agradecem à Faculdade Presidente Antônio Carlos em Conselheiro Lafaiete e a empresa MRS Logística S. A. pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 SCHNEIDER, E. L. Análise da vida remanescente de trilhos com defeitos transversais desgastados em serviço. Porto Alegre, UFRGS, Dissertação de Mestrado, 2005.
- 2 LIMBERGER, I. F. Estudo da propagação de trincas transversais por fadiga em trilhos ferroviários. Porto Alegre, UFRGS, Tese de Doutorado, 2000.
- 3 ASM HANDBOOK, 1996. Fatigue Failure in Metals. In: _____. Fatigue and Fracture. ASM International, v. 19, 1996. p. 148-171.
- 4 ZERBST, U., LUNDÉN, R., EDEL, K.-O., SMITH, R. A. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review. Engineering Fracture Mechanics, v. 76, p. 2563-2601, 2009.
- 5 ZERBST, U., SCHÖDEL, M., HEYDER, R. Damage tolerance investigations on rails. Engineering Fracture Mechanics, v. 76, p. 2637-2653, 2009
- 6 RICE, R. C. Shell and detail fracture formation in railroad rails. In: STEPHENS, R. I. (Ed). Case Studies for Fatigue Education, ASTM STP 1250, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994. p. 109-138.
- 7 SCHIJVE, J. Fatigue as a Phenomenon in the Material. In: _____. Fatigue of Structures and Materials. New York: Kluwer Academic Publishers, 2001. cap. 2, p. 7-44.
- 8 PAVLOV, V. V., GODIK, L. A., KORNEVA, L. V., KOZYREV, N. A., KUZNETSOV, E. P. Railroad rails made of bainitic steel. Springer Science Business Media, v. 51, p. 209-212, 2007.
- 9 MACEDO, M. L. K., SILVA, A. A. M., BARLAVENTO, M. A., REGULY, A. Avaliação mecânica e metalúrgica em trilho ferroviário utilizado em via contínua. In: JORNADAS SAM – CONAMET – AAS, 2001, Porto Alegre. Rio Grande do Sul: CONAMET, 2001. p. 519-526.
- 10 SILVA, A. A. M., LIMBERGER, I. F., REGULY, A. Análise de falha em segmento de trilho pertencente a uma união parafusada. In: JORNADAS SAM 2000 – IV COLOQUIO LATINOAMERICANO DE FRACTURA Y FATIGA, 2000, Porto Alegre. Rio Grande do Sul: IV COLOQUIO LATINOAMERICANO DE FRACTURA Y FATIGA, 2000. p. 807-814.
- 11 GODEFROID, L. B., CÂNDIDO, L.C., MORAIS, W. A. A Mecânica de Fratura. In: _____. Análise de Falhas. Programa de Educação Continuada da ABM, 2009.
- 12 PLU, J., BONDEUX, S., BOULANGER, D., HEYDER, R. Application of fracture mechanics methods to rail design and maintenance. Engineering Fracture Mechanics, v. 76, p. 2602-2611, 2009.
- 13 DANG VAN, K., MAINTOURNAM, M. H., MOUMNI, Z., ROGER, F. A comprehensive approach for modeling fatigue and fracture of rails. Engineering Fracture Mechanics, v. 76, p. 2626-2636, 2009.
- 14 FLETCHER, D. I., SMITH, L., KAPOOR, A. Rail rolling contact fatigue dependence on friction, predicted using fracture mechanics with a three-dimensional boundary element model. Engineering Fracture Mechanics, v. 76, p. 2612-2625, 2009.
- 15 CALLISTER JR., W. D. Falha. In: _____. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Traduzido por: Sérgio Murilo Stamile Soares, Rio de Janeiro: Editora LTC, 5^o Edição, 2002. cap. 8, p.129-167.
- 16 STEPHENS, R. I., FATEMI, A., STEPHENS, R. R., FUCHS, H. O. Fatigue Tests and the Stress-Life (S-N) Approach. In: _____. Metal Fatigue in Engineering. United States of American: John Wiley & Sons, 2001. cap. 4, p. 59-92.