

# Aumentando a vida útil dos trilhos através do Gerenciamento da Interface Roda-Trilho

F. O. Vidon<sup>1\*</sup>, W. V. Júnior<sup>1</sup>, J. C. Serpa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CH.Vidon Especialistas, Serviços e Equipamentos Ferroviários, Rua Halfeld 744, 36010-003, Juiz de Fora – MG

<sup>2</sup> Coordenação de Equipamentos Especiais, MRS Logística S.A., Av. Brasil 2001, 36060-010, Juiz de Fora - MG

e-mail: [fov@chvidon.com.br](mailto:fov@chvidon.com.br); [wvj@chvidon.com.br](mailto:wvj@chvidon.com.br); [joao.serpa@mrs.com.br](mailto:joao.serpa@mrs.com.br);

**Resumo:** Ferrovias tecnicamente avançadas reconhecem que uma abordagem integrada na interface roda-trilho fornece as melhores soluções em termos de desgaste de trilho e roda, ruído, custos operacionais e outros fatores. Os três principais “pilares” para um efetivo gerenciamento da interface roda-trilho são: adequada seleção e manutenção de perfis de rodas e trilhos; seleção adequada quanto as características metalúrgicas dos trilhos e controle efetivo do atrito entre trilho (face/topo do boleto) e roda (flange/bandagem). Focar apenas em um dos três pilares frequentemente conduz a práticas inadequadas ou não ideais.

Com a demanda de transporte cada vez maior, o entendimento e o gerenciamento da interface roda-trilho tornam-se fundamentais para o aumento do volume de transporte, possibilitando simultaneamente o aumento da vida útil dos dois maiores ativos de uma ferrovia: trilhos e rodas.

O contato roda-trilho é extremamente complexo. Um conhecimento multidisciplinar é necessário para entendê-lo, modelá-lo e otimizá-lo. O contato roda-trilho é absolutamente crítico para a segurança e eficiência operacional de uma malha ferroviária. Muito da complexidade do contato roda-trilho é devido ao fato de ser uma interface de natureza aberta, sendo assim sujeito a variações constantes. Ao longo de uma seção de linha, a posição, o tamanho e o esforço resultante também variam constantemente e diferentemente, não somente para cada tipo de veículo, mas também para cada roda de cada veículo, apesar de iniciar de um mesmo perfil que irá desgastar em diferentes modos.

A sinergia entre os três pilares da interface roda-trilho serão abordadas neste trabalho. A eliminação do desgaste face de bitola é uma realidade com uma lubrificação da face de bitola 100% efetiva, porém um desgaste mínimo é necessário, o que é alcançado com o uso do esmerilhamento de trilhos. O uso de trilhos de alta dureza não será a solução dos defeitos de RCF, a não ser que o perfil ideal do contato roda-trilho seja utilizado e uma quantidade controlada de material seja removida frequentemente.

**Palavras-Chaves:** Via Permanente; Contato Roda-Trilho, Gerenciamento do Atrito e Esmerilhamento de Trilhos.

## 1. INTRODUÇÃO

A interface roda-trilho representa um complexo ambiente operacional com diferentes tipos de carregamento que resultam em diferentes tipos de contato roda-trilho e diferentes estados de tensões. O tipo de contato e o estado de tensões variam em função de parâmetros da via e operacionais como por exemplo: curvatura e superelevação da via, velocidade do trem, condições do trilho e da roda. Este

ambiente de tensões associadas incluem as tensões críticas do contato roda-trilho.

A escolha do material para os trilhos é de fundamental importância. O comportamento do trilho em serviço depende criticamente das propriedades do metal. Formando uma interface direta com o material rodante, o trilho é altamente solicitado e é um item de segurança e crítico da via. O desgaste do trilho, especialmente em curvas apertadas, é um

problema bem documentado, e em alguns casos em lugares críticos só pode ser resolvido com a substituição frequente do ativo.

Nos últimos anos a produção de trilhos tem evoluído com o desenvolvimento de trilhos com elevada dureza e melhor resistência ao desgaste. Ao mesmo tempo, o Gerenciamento do Atrito surgiu e o desgaste passou a ser um problema controlável. Intervalos entre a substituição de trilhos tem aumentado, levando a uma diminuição dos custos.

Enquanto o desgaste tem sido reduzido, os defeitos de RCF tem se tornado proeminentes em linhas movimentadas onde os trilhos são altamente solicitados. Embora o trilho ainda esteja dentro da sua vida útil quanto ao desgaste, eles são substituídos pois os defeitos de fadiga de rolamento rapidamente tornam-se críticos para a segurança da via. O problema pode ser controlado com uma manutenção apropriada como o esmerilhamento. Através do esmerilhamento os perfis dos trilhos são projetados para produzirem uma menor solicitação nos trilhos.

Os três principais pilares para um efetivo gerenciamento da interface roda-trilho são: adequada seleção e manutenção de perfis de rodas e trilhos; seleção adequada quanto as características metalúrgicas dos trilhos e controle efetivo do atrito entre trilho (face/topo do boleto) e roda (flange/bandagem). Focar apenas em um dos três pilares frequentemente conduz a práticas inadequadas ou não ideais. A interface roda-trilho tem que ser tratada como um sistema, nunca podemos analisar as partes envolvidas isoladamente.

O aumento da vida útil dos trilhos neste trabalho será abordado através da interpretação do Diagrama de Shakedown.



Figura 1: Pilares para o gerenciamento da interface roda-trilho.

## 2. Teoria do Shakedown

Shakedown é um mecanismo geral para descrever deformações locais como resultado das tensões de contato. Ele fornece uma descrição elegante dos diferentes regimes de deformação de trilhos e rodas.

O diagrama de Shakedown fornece uma clara direção para melhoria da saúde do sistema roda-trilho.

A combinação de tensões de contato ( $P_0$ ), tração na superfície ( $T/N$ ) e resistência ao cisalhamento do aço ( $K$ ) são sumarizados no diagrama de Shakedown a fim de esclarecer o comportamento dos materiais.

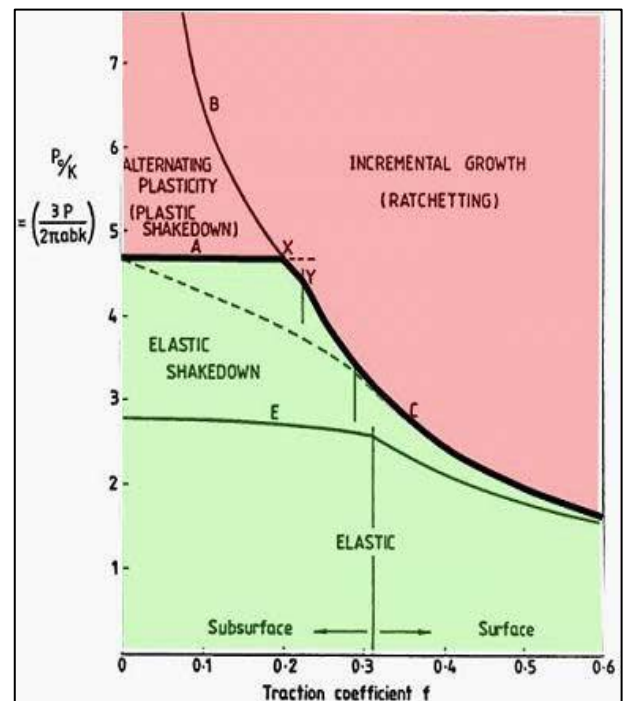


Figura 2: Diagrama de Shakedown.

O diagrama de Shakedown mostra essencialmente a tensão normal que pode ser suportada pelo contato roda-trilho em função do coeficiente de tração: a razão da tração pelo carregamento normal, o qual será tratado como  $T/N$ . O limite de Shakedown é mostrado com uma tensão não-dimensional  $P_0/k$  onde  $P_0$  é a máxima tensão normal de contato e  $K$  é a resistência ao cisalhamento.  $K$  é aproximadamente a metade da tensão de escoamento do trilho.

As linhas do diagrama de Shakedown representam os limites de tensão normal para um particular caso de carregamento. Abaixo da

linha A-C, o contato “shakes down” (deforma plasticamente) e deformação adicional não ocorrem. Para pequenos coeficientes de tração ou carregamento não-dimensional normal, as tensões de contato são puramente elásticas. Para baixos coeficientes de tração ou carregamento normal, os ciclos iniciais de carregamento deformam a superfície de material. Quando o carregamento é removido, existe a tensão residual no material que o protege e permite que o carregamento normal seja suportado. Entretanto, se a combinação do coeficiente de tração e carregamento normal elevam as condições de contato acima do limite de Shakedown (acima da Linha A-C), existirão ciclos de deformação em cada subsequente ciclo de carregamento. O material entra na zona rosa do gráfico Shakedown (Figura 2), o que significa que ele está em constante deformação plástica, fenômeno conhecido como ratchetting. O diagrama Shakedown determina qual a taxa de deformação plástica que o material estará sujeito.

Algumas características do diagrama de Shakedown são significativas para danos nos trilhos.

- O limite de Shakedown é mostrado como uma tensão não-dimensional. Em uma primeira aproximação, o carregamento normal é proporcional ao cubo da tensão. Portanto, se a tensão admissível é aumentada por um fator de 2, o carregamento admissível aumenta por um fator de 8.
- A resistência do material tem uma tremenda influência no carregamento que pode ser suportado. Tipicamente a resistência ao escoamento de um trilho head-hardened é o dobro do que num trilho de dureza 220 HB, portanto o trilho head-hardened pode suportar 8 vezes mais que o carregamento do trilho 220 HB sem deformação.
- O carregamento tangencial tem um enorme efeito na resistência da superfície de contato. Para um coeficiente de tração menor que 0,3, o limite de Shakedown é grosseiramente constante. Entretanto o limite diminui significativamente para coeficientes de tração altos. Consequentemente, se os trilhos estão secos e o coeficiente de atrito é alto, o carregamento que pode ser suportado é 1/8 do carregamento

que poderia ser suportado caso o trilho estivesse com o atrito controlado.

- Se o coeficiente de tração é menor que 0,30, a deformação será na subsuperfície. Para coeficientes de tração maiores que 0,30 a deformação será na superfície.

## 2.1. Ratchetting

A passagem das rodas resulta em repetitivos carregamentos no material da superfície do trilho. A Figura 3 ilustra o comportamento do material sujeito ao ensaio repetitivo de carregamento (*Push Pull Type*).

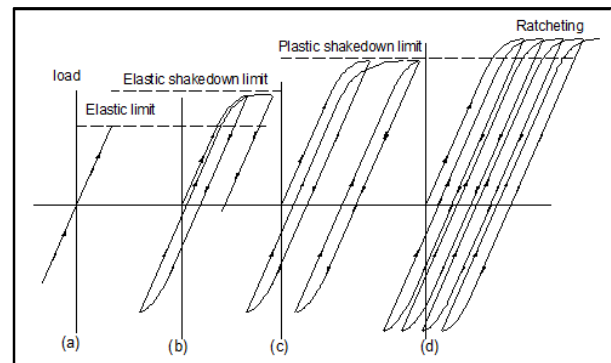


Figura 3: Fenômeno de Ratchetting.

No regime (a), os carregamentos são extremamente baixos e a deformação ocorre de modo puro (Lei de Hooke), o material irá falhar através de um altíssimo ciclo de repetições. No regime (b), o carregamento está acima do limite elástico e causa deformação plástica, resultando no desenvolvimento de tensão residual e o perfil do trilho se torna conformal. O material deforma no modo puramente elástico, mesmo que tenha deformado plasticamente nos carregamentos iniciais. Este processo é denominado Shakedown e o carregamento limite abaixo do qual é possível, é denominado como limite de Shakedown (Shakedown Limit – linha A-C da Figura 2). O material tem longa vida e irá falhar por um altíssimo ciclo de repetições. Se o carregamento for acima do limite de Shakedown, o escoamento ocorre. No regime (c), o material entra num ciclo de escoamento fechado e irá falhar quando submetido a um pequeno número de repetições. No regime (d) o ciclo de escoamento é aberto e cada ciclo de carregamento produz um aumento na deformação plástica, este regime é chamado de ratchetting ou colapso gradual. O limite entre os regimes (c) e (d) é conhecido como limite plástico de Shakedown.

A Figura 4 ilustra alguns fatores que interferem na teoria do Shakedown. No eixo vertical, fatores como deficiência de superelevação, altas cargas por eixo, pequeno diâmetro de rodas, perfis de roda e trilho incompatíveis, bitola apertada da via e inclinação incorreta do trilho, causam o aumento das tensões de contato fazendo com que o limite do Shakedown seja superado e em consequência, gera regime de escoamento na subsuperfície do trilho. No eixo horizontal, fatores como a falta de lubrificação, uso de enrijecedores de tração, creepages, operação de parada e partida de trens e rigidez da suspensão do truque, causam aumento do coeficiente de tração (Q/P), fazendo que o limite do Shakedown seja superado e consequentemente gerando regime de escoamento na superfície do trilho.

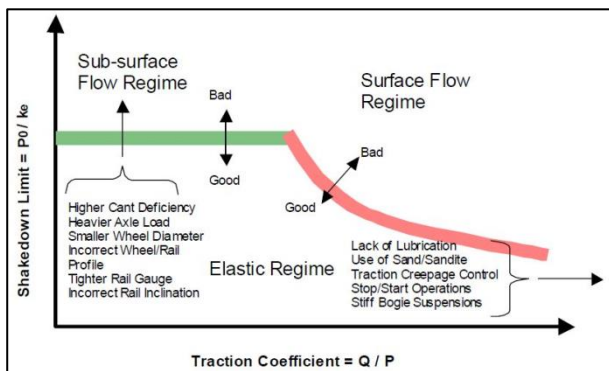


Figura 4: Fatores que influenciam a teoria do Shakedown.

### 3. DIMINUINDO AS TENSÕES DO MATERIAL DE ACORDO COM O DIAGRAMA DO SHAKEDOWN

#### 3.1. MINIMIZANDO AS TENSÕES DE CONTATO

As tensões de contato são responsáveis pelo fator de carga no Diagrama de Shakedown (eixo das ordenadas). As tensões de contato estão relacionadas com a forma do contato que por sua vez está relacionado com os perfis de trilhos e rodas.

As tensões de contato são causadas pela pressão de um sólido elástico sobre outro sólido em uma área limitada do contato. Muitos materiais que resistem a carregamentos, como por exemplo: vigas, trilhos, etc., são projetados primeiramente para suportar as tensões em toda a sua extensão. Essa tensão é diferente da tensão de contato, pois atua nas vizinhanças do ponto de aplicação do carregamento.

As tensões de contato são repetidas por uma grande quantidade de vezes, resultando em uma falha de fadiga do material, que inicia com uma fratura localizada (trinca) que é associada a uma tensão localizada.

No caso específico dos trilhos, a trinca por fadiga pode subsequentemente resultar ou contribuir para ocorrência de vários tipos de danos, comumente conhecidos como shelling, head checking, spalling e corrugações long pitch. Situações de extremo desgaste nos trilhos externos das curvas são associadas a elevadas tensões de contato localizadas.

O problema de tensões de contato foi estudado pela primeira vez por Hertz (1881), sua solução é à base da teoria conhecida como a clássica teoria Hertziana do contato elástico.

A solução mais simples para determinar a geometria e a tensão do contato roda-trilho é a análise de Hertz (Johnson, 1985), onde a roda e o trilho podem ser equacionados como dois cilindros em contato perpendicularmente entre si. A pressão máxima de contato,  $p$ , é dada por:

$$p = \sqrt[3]{\frac{3PE^2}{2\pi^3R^2(1-v^2)^2}}$$

Onde  $P$  é o carregamento normal,  $E$  e  $\nu$  são módulos de Young e Poisson (assumidos para serem os mesmos para trilho e roda neste caso) e  $R$  é o raio equivalente dado por:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Onde  $R_1$  e  $R_2$  são os raios de contato da roda e do trilho. Devido às considerações assumidas, como por exemplo, planicidade das superfícies de contato, resposta linear elástica do material, o atrito zero no contato, a precisão da fórmula é limitada. Particularmente no contato no flange da roda, o raio de contato pode ser menor que 10 mm, o que invalida a equação. Para um sistema de trem metropolitano, a pressão hertziana máxima de contato varia de 600 MPa na banda de rodagem e topo do trilho até 2700 MPa no flange da roda/canto de bitola.

Cada tipo de contato é responsável por uma diferente tensão de contato. O contato por um ponto é o mais agressivo para o trilho,

rapidamente o canto de bitola entra em colapso. O contato em conformidade é o que gera as menores tensões pois; distribui melhor a pressão sobre o boleto do trilho. A existência de dois pontos de contato está associada a um grande deslizamento e desgaste se a força do flange e o creepage lateral estão presentes, no caso de curvas. Sob essas condições o flange se desgasta aceleradamente até a forma do flange conformar com a forma do trilho. O contato é tão severo que o escoamento de material ocorre no flange da roda.



Figura 5: Tipos de contato roda-trilho.

O perfil do trilho e da roda definem as pressões de contato, na Figura 6 temos o exemplo dos tipos de contato e a pressão de contato correspondente.

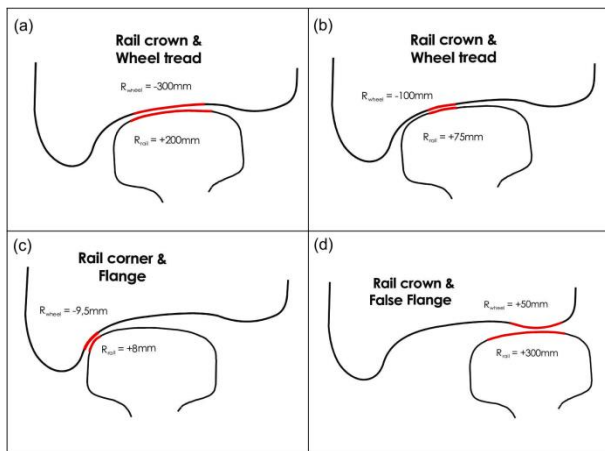


Figura 6: Vários tipos de contato e a variação da Pressão de contato. (a)  $P_o=1130$  MPa (b)  $P_o=2678$  MPa (c)  $P_o=2678$  MPa (d)  $P_o=2845$  MPa.

A utilização e manutenção de perfis de trilhos otimizados minimizam as tensões de contato, melhoram a estabilidade do trem e o desempenho em curvas, distribuem as pressões de contato em uma maior área da pista de rolamento da roda evitando a formação de falso flange.

Para a otimização e manutenção dos perfis de trilho é necessária a tecnologia de Esmerilhamento de Trilhos. O esmerilhamento do trilho refere-se ao método de controlar e manter o perfil do trilho. O esmerilhamento vai

além da básica remoção do defeito, ele visa modificar o perfil do boleto do trilho e a geometria do contato roda-trilho. Assim o esmerilhamento envolve um específico perfil do boleto do trilho, o qual permite definir a localização do contato roda-trilho

O principal propósito da otimização dos perfis de trilhos e rodas é a redução do estado de tensão na interface roda-trilho. Os perfis de trilhos e rodas devem ser otimizados juntos. A otimização do perfil das rodas é realizada pelo reperfilamento das rodas.

Em geral o esmerilhamento engloba três amplas áreas da manutenção do trilho:

1. Controle do desgaste da face de bitola e forças laterais
2. Controle das fadigas de contato por rolamento (RCF)
3. Controle de corrugação

Os benefícios da prática de esmerilhamento na manutenção do trilho são associados ao aumento do desempenho do trilho e extensão da vida útil. Adicionais benefícios são associados à redução do carregamento dinâmico roda-trilho, ou seja, a redução da carga de impacto vertical e redução das forças laterais dinâmicas.

A melhor prática de esmerilhamento existente na América do Norte para ferrovias heavy haul tem evoluído nas últimas três décadas. O esmerilhamento foi introduzido em 1960 quando altas cargas por eixo sobre trilhos de baixa resistência resultaram na rápida formação de corrugação no trilho interno, que reduziu a vida útil do trilho a valores tão baixos como 50 MGT. Foi introduzido então o esmerilhamento anual pesado de múltiplos passes com a esperança de aumentar a vida útil do trilho. Mesmo com o esmerilhamento pesado, a corrugação não foi controlada. Algumas ferrovias adotaram esmerilhamento duas vezes por ano e mesmo assim ficou evidente que a corrugação jamais seria totalmente removida juntamente com as trincas profundas que se formavam nos vales dos defeitos da corrugação. Embora o impacto do esmerilhamento fosse positivo, este foi denominado como um procedimento de correção (esmerilhar depois que o defeito torna-se severo), que poderia ser melhorado dobrando a frequência de esmerilhamento. Isto evoluiu para a concepção que o ciclo de esmerilhamento deveria ser baseado na

tonelagem em vez do tempo. Uma vez que surgiu a filosofia de esmerilhamento frequente baseado na tonelagem e no perfil específico do trilho, a ideia de esmerilhamento preventivo foi lançada. Com esta nova estratégia de esmerilhamento a corrugação foi gradualmente removida e mantida sob controle.

Uma contínua e frequente remoção de pequena quantidade do material da superfície do trilho através do esmerilhamento pode estancar e, eliminar a propagação inicial de trincas.

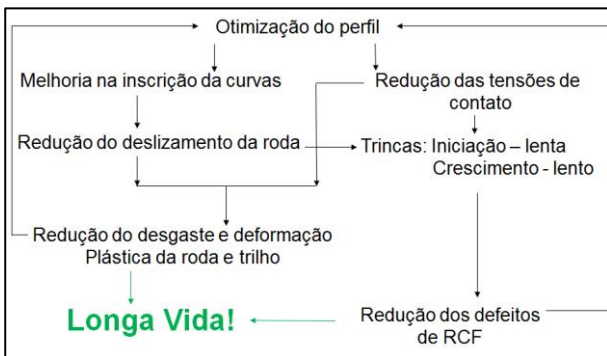


Figura 7: Feedback de otimização de perfis em curvas.



Figura 8: Esmerilhadora de Trilhos de 90 rebolos da MRS Logística.

### 3.2. Minimizando a tração

Neste item iremos interpretar o eixo horizontal do Diagrama do Shakedown pois, para evitar o colapso do trilho, o material terá que trabalhar próximo da interseção dos eixos horizontal (tração) e vertical (fator de carga).

Como mostrado na Figura 9, é evidente que para baixos valores de T/N (até 0,2) a tensão máxima de cisalhamento é obtida a certa profundidade da superfície do trilho, a qual corresponde à região onde geralmente o shelling é desenvolvido. Altas cargas por eixo aumentam a força normal e assim reduzem o

valor de T/N, o qual leva a formação de trincas na subsuperfície dos trilhos.

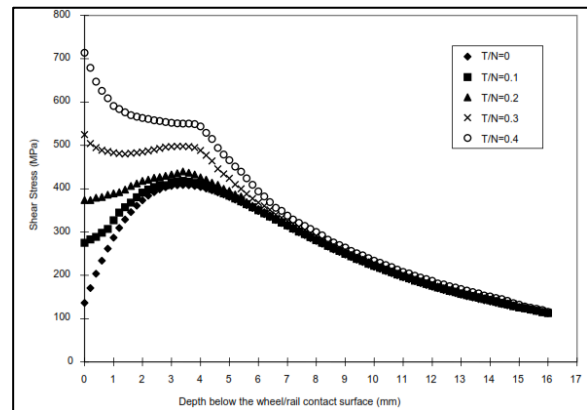


Figura 9: Relação de Tensão de Cisalhamento x Tração x profundidade das trincas.

Por outro lado, altos valores de T/N são obtidos em curvas apertadas (devido às forças de inscrição do truque), ocasionalmente em curvas moderadas ou tangentes (devido a adversidades dinâmicas como hunting) ou em baixas cargas por eixo, resultando no aumento da tensão de cisalhamento e movendo a região de máxima tensão para próximo à superfície do trilho, onde os head checks são iniciados.

A Figura 10 exemplifica a tensão de cisalhamento em função do coeficiente de atrito. Quando o coeficiente de atrito na superfície é zero, a máxima tensão de cisalhamento é localizada 0.1" abaixo da superfície com amplitude de 53 ksi para uma carga vertical de 19 kips. Entretanto se o coeficiente de atrito atinge 0.5, a máxima tensão de cisalhamento move-se para perto da superfície e sua magnitude aumenta para 80 ksi.

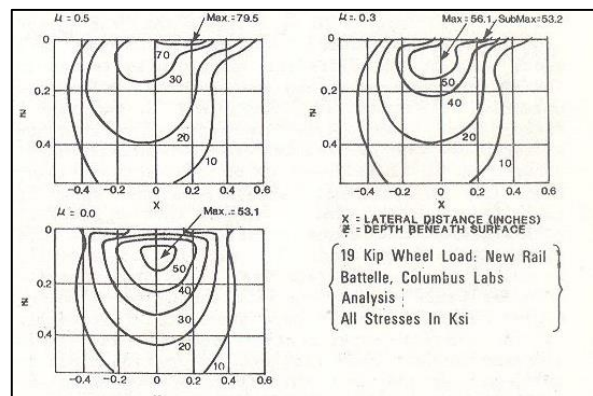


Figura 10: Influência da tração na tensão de cisalhamento.

Para qualquer coeficiente de atrito maior que 0.3, as forças tangenciais (tração) na superfície provocam as primeiras deformações.

Com a utilização do Gerenciamento do Atrito, que é o processo de controle e manutenção do coeficiente de atrito nas bandas de contato da interface roda-trilho em valores apropriados para um ótimo desempenho do sistema roda-trilho, as forças longitudinais são diminuídas e conseqüentemente as solicitações no trilho são menores e a tendência é o aumento da vida útil do mesmo.

A lubrificação da face de bitola combate o desgaste do flange da roda e da face/canto de bitola dos trilhos enquanto o controle do atrito no topo do trilho combate o desgaste na banda de rodagem das rodas e topo do trilho.



Figura 11: Níveis ideais de atrito.

Quando o coeficiente de atrito é baixo ( $<0,30$ ), os defeitos como shelling irão surgir na subsuperfície do trilho. Daí surge a importância de uma boa prática de esmerilhamento para evitar o aparecimento dos deep seated shells.

### 3.3. Usando materiais de alta resistência

Primeiramente o aço do trilho deve possuir o mínimo possível de defeitos internos para evitar a inicialização de trincas. Modernas especificações de trilhos levam isso em conta, impondo limites de pureza do aço (cleanliness).

Trilhos de alta dureza devem ser usados se a via é altamente solicitada. Nos últimos anos trilhos HH tem sido usados em curvas apertadas onde o excessivo desgaste é motivo da troca frequente do trilho. Para atender ao aumento das demandas comerciais no futuro, será necessário o aumento da carga por eixo das ferrovias.

Está claro que trilhos de alta resistência devem ser usados para evitar a formação de trincas

em tangentes ou curvas suaves com altas forças longitudinais. A alta resistência ao desgaste e o longo período de encubação até as trincas serem formadas são benéficas para a vida útil. Se as trincas aparecerem, a camada trincada deve ser removida completamente pelo esmerilhamento.

A grande reserva contra o desgaste que os trilhos HH possuem será tanto pelo desgaste causado pelas rodas dos trens quanto pela remoção de material necessária para evitar as trincas (esmerilhamento). Kalousek e Magel demonstraram que a vida do trilho pode ser estendida por esse método.

As principais propriedades mecânicas do trilho são dureza HBN (Hardness Brinell Number), tensão de escoamento MPa, resistência a tração MPa (Ultimate Tensile Stress) e Alongamento (%).

Tabela 1: Influência do tipo de trilho na propagação da trinca.

Steel	Hardness (Brinell)	Shear Strength (K)	
		ksi	MPa
Standard™	260-280	65-70	448-483
“Intermediate”	320-340	80-85	552-587
Premium	340-380	85-95	587-656
“HE Premium”*	380-400	95-100	656-691

O trilho de alta resistência possui elevada tensão de cisalhamento e sob condições operacionais favoráveis, mantém todas suas características elásticas.

As figuras 12 e 13 apresentam a influência do material do trilho (dureza e resistência de cisalhamento) no Diagrama de Shakedown. A pressão de contato e o coeficiente de atrito permaneceram os mesmos, apenas variando o tipo de trilho.

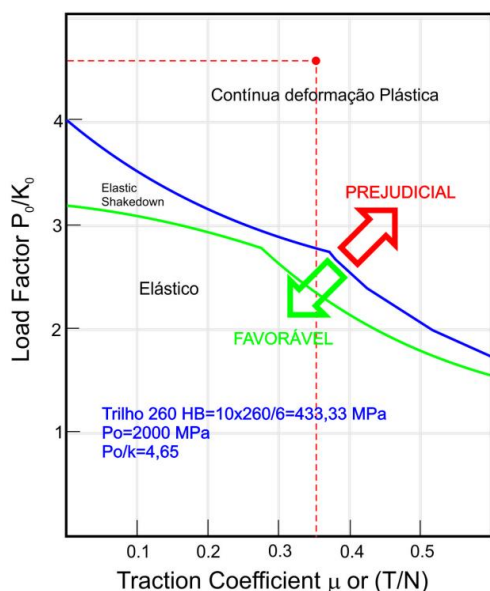


Figura 12: Diagrama de Shakedown para um trilho de dureza 260 HB,  $P_o=2000$  MPa e  $\mu=0,35$ .

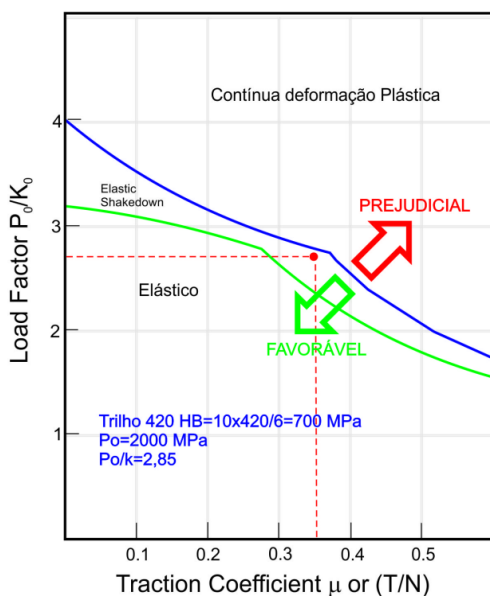


Figura 13: Diagrama de Shakedown para um trilho de dureza 420 HB,  $P_o=2000$  MPa e  $\mu=0,35$ .

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentamos a relação e a importância dos três pilares para o gerenciamento e entendimento da interface roda-trilho: otimização e manutenção dos perfis, gestão do atrito e metalurgia de trilhos.

A interface roda-trilho tem que ser tratada como um sistema. Uma abordagem isolada de uma das partes levará a práticas inadequadas.

A maior vida útil dos trilhos só será alcançada com a abordagem conjunta dos três pilares demonstrados neste trabalho desde de que as

condições de manutenção da via permanente estejam em padrões aceitáveis.

#### 5. REFERÊNCIAS

Carmo, R.; Vidon, F.; Eadie, D.; Oldkown, K.; Lopes, L; O Gerenciamento do Atrito na MRS Logística, III Encontro de Ferrovias, 2012, Juiz de Fora.

Harder rails prove their worth, IRJ, December 2008.

Grassie, S; Defects, Dynamics and Contact Mechanics, International Heavy Haul Association, 2013

Kalousek, J., The "Magic" Wear Rate, Railway Track & Structure, Março, 1997.

Kalousek, J.; Klein, R., Investigation into Causes of Rail Corrugation, AREA-Bolletín nº 656, Vol. 77, Fevereiro, 1976.

Kalousek, J., Managing Wheel Rail Interface - Preventive and Corrective Actions, Workshop Contato Roda-Trilho, IME, Rio de Janeiro, 2008.

Ointner, P.; Frank, N., Analysis of rolling contact fatigue helps develop tougher rail steels, Railway Gazette International, November, 1999

Roney, M; Eadie, D. T; Oldknow, K; Sroba, P; Caldwell, R; Santoro, M; Total Friction Management on Canadian Pacific, International Heavy Haul Association, 2009.

Sroba, P.; Magel, E., "Control of Rolling Contact Fatigue in Rails", AREMA ANNUAL CONFERENCE, Nashville, 2004.

Vidon, F., Fundamentos do Gerenciamento do Atrito, IME, Rio de Janeiro, 2012.

Vidon, W.; Case Study: Trilho de Alta Dureza é o "Pior"?, Workshop Contato Roda-Trilho, IME, Rio de Janeiro, 2008.

Zarembiski, A.; Managing the wheel/rail interface with Grinding, Railway Track & Structures, Dezembro, 2011.