

ESTUDO DO DESGASTE DE TRILHOS FERROVIÁRIOS

Fernanda Bittencourt Macêdo

MONOGRAFIA SUBMETIDA À COORDENAÇÃO DE CURSO DE ENGENHARIA
DE PRODUÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PRODUÇÃO.

Aprovada por:

Prof. Marcos Martins Borges, D. Sc.

Prof. Eduardo Breviglieri Pereira de Castro, D. SC.

Guilherme Scagion Gazabim

JUIZ DE FORA, MG – BRASIL

JUNHO DE 2009

Macêdo, Fernanda Bittencourt.

Estudo do desgaste de trilhos ferroviários / Fernanda Bittencourt Macêdo. -- 2009.

41 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

1. Ferrovias. 2. Trilhos. 3. Trilhos - defeito. I. Título

CDU 625.1

DEDICATÓRIA:

Dedico este trabalho primeiramente aos meus pais, com quem pude contar em todos os momentos, e àqueles que me ajudaram a atingir o objetivo de me tornar Engenheira de Produção.

AGRADECIMENTOS:

Primeiramente a Deus pelo dom mais precioso, a vida.

Agradeço a minha família e amigos, que me possibilitaram chegar até aqui e sempre estiveram presentes nas horas mais difíceis.

Aos mestres, que se dedicaram a me ensinar muito do que sei hoje.

Ao professor e orientador, Marcos Martins Borges, pelo auxílio, paciência, direcionamento e tranquilidade que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

A MRS Logística, maior incentivadora na escolha do tema a ser abordado.

O meu muito obrigado a vocês, não somente pelo conhecimento passado, mas também pelo carinho dedicado.

Resumo da monografia apresentada à Coordenação de Curso de Engenharia de Produção como parte dos requisitos necessários para a graduação em Engenharia Produção.

ESTUDO DO DESGASTE DE TRILHOS FERROVIÁRIOS

Fernanda Bittencourt Macêdo

Junho/2009

Orientador: Marcos Martins Borges, DSc

Curso: Engenharia de Produção

O trilho é sem margem de dúvidas o componente mais importante da superestrutura ferroviária. É tecnicamente considerado o principal elemento de suporte e guia dos veículos ferroviários, e economicamente detém o maior custo dentre os elementos estruturais de via. Assim sendo, torna-se imprescindível o uso adequado e racional desse material. Para tal, este estudo fundamenta-se na conceituação do desgaste dos trilhos, destacando não somente as normas de utilização, mas também suas funções, características técnicas do material, processo de fabricação, os defeitos e os limites de tolerância tradicionalmente aceitos, para que se possa evitar ao máximo sua substituição, devido ao alto custo envolvido e também a questão da segurança da via que, dependendo do defeito, pode ser comprometida. Para a realização do trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica, objetivando reunir informações sobre o assunto e levantar dissertações existentes que buscam solucionar tais problemas.

Palavras-chave: Ferrovia. Via Permanente. Trilho. Desgaste de trilho. Defeitos de trilho.

Juiz de Fora

Junho – 2009

Abstract of the monograph presented to the Coordination of the Production Engineering Course as part of the necessary requirements for graduating in Production Engineering.

STUDY OF WEAR OF RAIL TRAILS

Fernanda Bittencourt Macêdo

June/2009

Advisor: Prof. Marcos Martins Borges, Dr.

Course: Production Engineering

The trail is no room for doubt the most important component of the railway superstructure. It is technically considered the main element of support and guidance of railway vehicles, and has the greatest economic cost from the structural elements of track. Therefore, it is essential to rational and appropriate use of that material. To this end, this study is based on the concept of wear on the rails, highlighting not only the rules of use, but their functions, technical characteristics of the material, the manufacturing process, the defects and the traditionally accepted boundaries of tolerance, to can prevent up to its replacement, due to the high cost involved and also the issue of security by which, depending on the defect, may be compromised. For the implementation of the work was done a literature search, to gather information on the subject and raise existing essays that seek remedy such problems.

Key-Words: Railroad. Road Permit. Trail. Trail wear on. Defects in trail.

Juiz de Fora

June/2009

SUMÁRIO

Capítulo I.....	1
1.1. Apresentação.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Justificativa do Tema	2
1.4. Condições de Contorno	2
1.5. Metodologia	2
Capítulo II.....	4
2.1. O aparecimento das Estradas de Ferro	4
2.2. As Estradas de Ferro no Brasil	5
2.3. Superestrutura ferroviária	6
2.4. Perfil do trilho.....	9
2.5. Fabricação dos trilhos.....	10
2.5.1. Composição do aço para trilhos	11
2.5.2. Processos de fabricação	11
Capítulo III.....	13
3.1. A via férrea, os trilhos e seu desgaste	13
3.1.1. Defeitos de Fabricação	14
3.1.2. Defeitos originados em serviço	16
3.2. Contato roda-trilho	21
3.3. Limites de uso do trilho	25
3.4. Esmerilhamento.....	29
3.5. Exemplo prático de defeito de desgaste	31
Capítulo V	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 01: Primeira Locomotiva a vapor.....	04
Figura 02: Elementos da via permanente.....	06
Figura 03: Bitola de via.....	07
Figura 04: Perfil Vignole.....	09
Figura 05: Padronização da AREMA para a estampa de trilhos.....	10
Figura 06: Processos de fabricação do trilho.....	12
Figura 07: Segregação do aço.....	14
Figura 08: Defeito causado por sujeira no aço.....	15
Figura 09: Trinca transversal.....	15
Figura 10: Trilho com desgaste.....	16
Figura 11: Perfilógrafo.....	17
Figura 12: Deformação plástica.....	18
Figura 13: Corrugação claramente visível.....	19
Figura 14: Carro-controle.....	20
Figura 15: Contato roda-trilho.....	21
Figura 16: Superfície de contato roda-trilho.....	22
Figura 17: Contato de 1 ou 2 pontos entre o friso e a roda.....	23
Figura 18: Ângulo trilho novo.....	24
Figura 19: Ângulo trilho desgastado.....	24
Figura 20: Roda nova e trilho usado.....	24
Figura 21: Desgaste lateral.....	26
Figura 22: Desgaste vertical.....	26
Figura 23: Esquema do gabarito de desgaste do boleto de trilhos.....	27
Figura 24: Gerenciamento do TR-57.....	28
Figura 25: Gerenciamento do TR-68.....	28
Figura 26: Trem esmerilador MRS.....	30
Figura 27: Trem esmerilador Speno.....	30
Figura 28: Trilho desgastado.....	32
Figura 29: Simulação de um acidente ferroviário.....	34

SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 01: Máximo desgaste do boleto.....	26
Tabela 02: Limite de desgaste do boleto para trilhos de segunda-mão.....	27

Capítulo I

INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

O sistema ferroviário é um importante modal no país, principalmente para o transporte de cargas. Economicamente interessante para as ferrovias, seria terem tempos de viagem mais curtos (*transit time*), além de maior capacidade de cargas a transportar, aumentando a competitividade do sistema. Isto seria conseguido com o aumento da velocidade e da capacidade de carga das vias.

Torna-se, dessa forma, necessário que a segurança da via seja preservada, mantendo a integridade, a confiabilidade do sistema e o conforto, sobretudo, em linhas de passageiros.

Uma consequência lógica das maiores velocidades e cargas por eixo nas vias, porém, é o aparecimento de defeitos e o aumento de desgastes na via ao longo do tempo.

Neste tipo de transporte, como se sabe, o veículo é guiado sobre trilhos metálicos através de rodas também metálicas. O contato roda-trilho causa desgaste em ambos os elementos, sendo que as tensões de contato, que ocorrem numa pequena área, são responsáveis pelo surgimento de muitos defeitos nos trilhos (MAGALHÃES, 2000).

O aumento da velocidade e das cargas altera a dinâmica do contato e, com isso, os defeitos têm aumentado muito nas últimas décadas, e os desgastes evoluíram rapidamente, tornando-se uma preocupação para os engenheiros ferroviários.

Com a maior incidência desses defeitos e com o rápido desgaste da via, aumentam os cuidados com a manutenção requerida pelo sistema. Assim, o desgaste dos trilhos, quando atinge determinado limite, passa a exigir a substituição dos mesmos. Devido ao alto custo do material e da manutenção envolvidos na operação, a engenharia ferroviária busca meios de atenuar estes problemas sem afetar o desenvolvimento do sistema.

Pesquisas abrangendo o desenvolvimento de novos materiais, a alteração das características do aço, incluindo a purificação e aumento da dureza, o desenvolvimento de novos perfis de trilho e a dinâmica da interação roda-trilho, são realizadas a fim de possibilitar a aplicação de perfis com contato roda-trilho otimizados.

O que estes estudos buscam são meios de aumentar a vida útil dos trilhos, postergando sua troca e assim reduzindo os custos de manutenção, pois a vida útil dos trilhos está relacionada com seu limite de desgaste. Segundo Brina (1979), o perfil de um

trilho novo apresenta uma determinada seção e, com o tráfego, vai se desgastando, ou seja, perdendo material, tendo sua seção diminuída.

Ao longo da malha ferroviária brasileira, podem-se encontrar trilhos com características distintas, de diversos fabricantes, tamanhos e composições químicas, o que faz com que cada trilho tenha um desempenho diferente.

Com isso, vem a necessidade do melhor entendimento desse desempenho dos trilhos de via férrea.

1.2. Objetivos

O presente estudo tem como objetivo apresentar o tema Desgaste de Trilhos, destacando o seu desempenho, critérios de desgaste, funções, processo de fabricação e características técnicas do material, a fim de compreender o que leva a sua substituição frente ao intenso tráfego de trens e conhecer seus limites de tolerância tradicionalmente aceitos.

1.3. Justificativa do Tema

O trilho é um componente fundamental no sistema ferroviário e também o ativo de maior custo da via permanente. Para otimizar o seu uso são necessários estudos de sua vida útil e formas de desgaste, pois a segurança e a eficiência devem sempre ser mantidas. Vale ressaltar que a oportunidade de observar durante o estágio tais características, serviu como base para a realização deste trabalho.

1.4. Condições de Contorno

Com base na revisão da literatura existente que trata do tema, são apresentados os aspectos relevantes destacados pelos autores, no que tange a via permanente das ferrovias, com foco na performance dos trilhos assentados ao longo da malha ferroviária brasileira. Necessário se faz enfatizar, entretanto, a notada escassez de literatura versando sobre o assunto. As produções dos autores, com raras exceções, datam de mais de uma década, demonstrando que o assunto perdeu o interesse acadêmico por um longo período, devido à grave estagnação sofrida pelo transporte ferroviário brasileiro. Após a privatização deste serviço, com a retomada do modal ferroviário, espera-se que as pesquisas acadêmicas voltem-se mais intensamente para o setor, resultando na produção de novos materiais bibliográficos atendendo a demanda crescente por conhecimento específico na área de ferrovias.

1.5. Metodologia

A partir da escolha do tema Desgaste dos Trilhos como foco dos estudos, o levantamento das informações pertinentes consiste em revisões bibliográficas em artigos, teses e livros publicados acerca do assunto e a abordagem do “estado da arte” sobre o conhecimento envolvido na elaboração do trabalho. Ao final deste, é apresentado um exemplo prático acerca do desempenho dos trilhos frente à circulação dos trens de carga em uma empresa do ramo ferroviário.

Capítulo II

CONCEITOS BÁSICOS

Buscando a familiarização dos termos utilizados neste trabalho e a facilitação do entendimento geral, segue de forma sucinta uma apresentação dos principais conceitos e relações envolvidos com a performance de trilhos.

2.1. O aparecimento das Estradas de Ferro

Diversos países europeus utilizavam ferrovias desde o início do século XVI. No entanto, estas ferrovias destinavam-se principalmente para o transporte do carvão e minério de ferro extraídos de minas subterrâneas. De acordo com Duval e Magalhães (2006), as ferrovias de mineração consistiam de dois trilhos de madeira que penetravam até o interior da mina. Homens ou cavalos puxavam os vagões munidos de rodas ou frisos ao longo dos trilhos. Os vagões moviam-se com mais facilidade sobre os trilhos do que sobre a terra cheia de sulcos e enlameada, ou sobre o chão das minas.

No início do séc. XVIII, as companhias de exploração de carvão da Inglaterra iniciaram a construção de pequenas estradas de trilhos de madeira para transportar carvão na superfície e no subsolo. Cavalos tracionavam uma sucessão de vagões sobre os trilhos. Em meados do séc. XVIII os trabalhadores começaram a revestir os trilhos de madeira com tiras de ferro a fim de torná-los mais duráveis.

Neste período, inventores desenvolviam a máquina a vapor. Segundo Duval e Magalhães (2006), no início do séc. XIX, o inventor inglês Richard Trevithick construiu a primeira máquina capaz de aproveitar a alta pressão do vapor. Montou-a sobre uma subestrutura de quatro rodas planejada para se deslocar sobre trilhos. Em 1804, Trevithick fez uma experiência com este veículo, puxando um vagão carregado com 9 toneladas de carvão por uma extensão de 15 km de trilhos. Era a primeira locomotiva bem-sucedida do mundo. Logo, outros inventores ingleses seguiram seu exemplo.

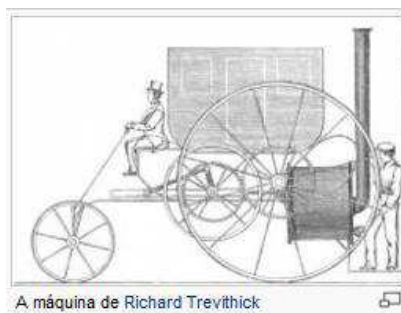


Figura 01 – Primeira Locomotiva a vapor

Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

Um construtor de locomotivas inglês, George Stephenson, construiu a primeira ferrovia pública do mundo, ligando Stockton a Darlington. Foi inaugurada em 1825 e cobria uma distância de 32 km. Tornou-se a primeira ferrovia a conduzir trens de carga em horários regulares. A segunda ferrovia de Stephenson foi entregue ao público em 1830. Tinha 48 km de extensão e ligava Liverpool a Manchester. Tratava-se da primeira ferrovia a conduzir trens de passageiros em horários regulares (BRINA, 1979).

Desta data em diante, ficou consagrada definitivamente a Estrada de Ferro, como meio de transporte terrestre, tendo progredido rapidamente em todo o mundo.

2.2. As Estradas de Ferro no Brasil

Segundo Brina (1979), a ferrovia brasileira teve sua primeira tentativa de implantação em 1835, quando o regente Diogo Antônio Feijó sancionou o Decreto 100, autorizando o governo a conceder carta de privilégios para quem fizesse uma estrada de ferro do Rio de Janeiro (então capital) para as províncias de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia.

A construção da estrada de ferro se fazia necessária, pois o país necessitava dar escoamento à produção dos produtos agrícolas destinados à exportação e ao abastecimento interno.

Em 1840, o médico inglês Tomaz Cockrane, obteve concessão para fazer a ligação ferroviária Rio de Janeiro – São Paulo com diversos privilégios. Entretanto, teve seu contrato rescindido mais tarde, pois não conseguiu dar início a obra, após sucessivos pedidos de adiamento.

Em 1852, a figura intrépida do Barão de Mauá construiu a ligação entre o Porto de Mauá (no interior da Bahia de Guanabara) e a Raiz da Serra (Petrópolis). Somente em 30 de abril de 1854 foi inaugurada a *Companhia Estrada de Ferro D. Pedro II*, com 14,5 Km de extensão percorridos com velocidade média de 38 Km/h (BRINA, 1979).

Em 15 de novembro de 1889 é proclamada a República e por aviso do Governo Provisório, a partir de 22 de novembro a Estrada de Ferro D. Pedro II passa a denominar-se *Estrada de Ferro Central do Brasil*.

O pontapé inicial havia sido dado e as companhias ferroviárias brasileiras começaram a surgir. Muitos acontecimentos importantes (ampliação de linhas, surgimento de novas companhias, o sucesso da ferrovia, competição com as rodovias, por exemplo) foram registrados entre 1889 até os dias atuais.

2.3. Superestrutura ferroviária

O sistema ferroviário nasce da interação entre a Via Permanente (infra e superestrutura) e Material Rodante (locomotivas e vagões), necessários ao transporte.

A via férrea é composta pela infra-estrutura, plataforma e o maciço adjacente, e pela superestrutura viária, a qual será tratada a seguir.

A superestrutura ferroviária é um conjunto de quatro elementos heterogêneos que se interagem para suprir as condições adequadas de suporte, pista de rolamento e guia para o material rodante que por ela trafega.

Os elementos são: trilhos, dormentes, fixação e lastro, conforme ilustrado na figura 02. Além destes quatro elementos, alguns autores incluem o sublastro como o quinto componente da superestrutura.

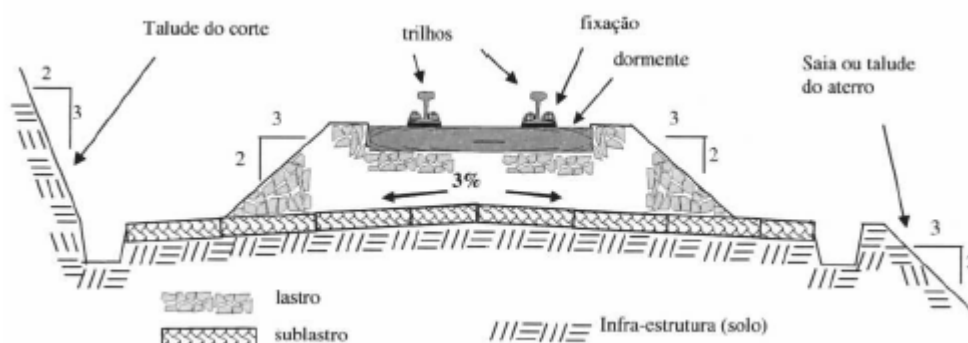


Figura 02 – Elementos da via permanente

Fonte: Duval e Magalhães (2006)

O sublastro é o elemento que está ligado à infra-estrutura da via. Segundo Paiva (1999), é empregado para evitar a penetração do lastro no solo e a contaminação do lastro por material fino decorrente do leito. A maior impermeabilidade do sublastro, em relação ao solo, melhora a drenagem, evitando a erosão e a penetração da água no solo. É também utilizado quando as condições do tráfego forem muito severas, ou ainda quando a altura do lastro superar 40 centímetros, por razões econômicas, já que o material do lastro é frequentemente mais caro que do sublastro.

O lastro é a camada de material granular que fica entre o sublastro e os dormentes. Suas funções são: manter a superestrutura drenada, distribuir a pressão exercida pelos

dormentes à infra-estrutura, além de envolver lateral e longitudinalmente os trilhos e os dormentes, impedindo a movimentação nesses sentidos.

Para desempenhar suas funções básicas, o lastro deve ter as seguintes características:

- Natureza do material: apesar de ter sido muito usado no passado, a terra e areia não preenchem as características recomendadas para o lastro. O mais usual é a pedra britada, escórias de aciaria e cascalho quebrado.
- Granulometria (dimensões): em grandes dimensões as pedras de lastro dificultam o nivelamento e principalmente a manutenção duradoura deste. Por outro lado, dimensões muito pequenas acarretam a rápida colmatagem (atulhamento por sedimentos), fazendo com que o lastro perca a elasticidade e a capacidade drenante.
- Forma geométrica das partículas: é desejável que as partículas sejam de forma cúbicas. Devem ser evitadas as de forma lamelar.

Por sua vez, o dormente é o elemento da superestrutura ferroviária que tem por função receber e transmitir ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos, servindo de suporte dos trilhos, permitindo a sua fixação e mantendo invariável a distância entre eles (bitola da linha),

Segundo definição de Schramm (1977), a bitola é a distância entre os dois trilhos da linha, medida de 12 a 16 mm abaixo da superfície de rolamento do bolete (Figura 03). Varia conforme o país, sendo que, no Brasil, são adotadas as seguintes bitolas: 1,00 m; 1,435m , 1,60m e bitolas mistas, sendo preponderante a bitola métrica ou estreita, com 1,00 m.

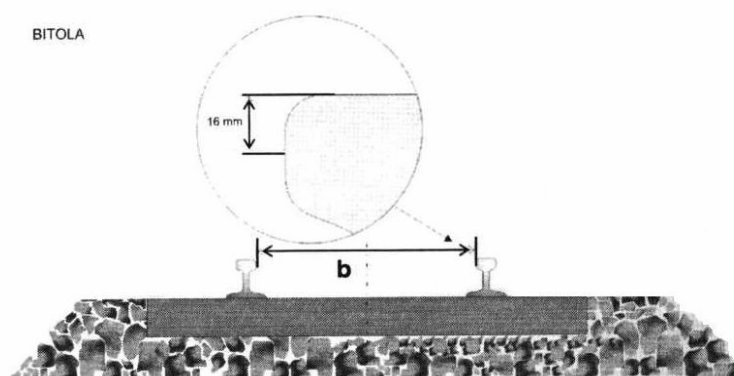


Figura 03 – Bitola de via

Fonte: Technicontrol (2007)

Para atender aos requisitos de uma viga, o principal material usado como dormente tem sido a madeira. Entretanto, outros materiais vêm ganhando terreno, como o concreto e o aço (DUVAL e MAGALHÃES, 2006).

a) Madeira:

A madeira tem sido, tradicionalmente, o material ideal para atender as funções que um dormente cumpre numa via permanente. Tem uma resistência mecânica compatível com as necessidades, supre uma boa ancoragem à linha, é relativamente leve, tem uma ótima trabalhabilidade e proporciona a elasticidade ideal na linha. Além da qualidade da madeira, outros fatores têm influência na durabilidade dos dormentes, tais como o clima, drenagem da via, peso e velocidade dos trens, tipo de fixação do trilho usado, tipo do lastro, entre outros. Tratamentos químicos que eram aplicados aos dormentes visando melhorar sua vida útil têm sido fortemente combatidos pelas instituições protetoras do meio ambiente.

b) Dormente de concreto:

O concreto pode ser de dois tipos quanto à forma, o monobloco e o bi-bloco. Estes dormentes têm apresentado resistência mecânica e ancoragem adequadas, já que seus projetos são normalmente de acordo com a solicitação da ferrovia para onde são planejados. Nas demais propriedades o concreto perde para a madeira. Proporciona uma rigidez inadequada à linha e tem péssima trabalhabilidade. Seu peso (mais de 300 kg) impede qualquer trabalho com os recursos convencionais de equipamentos e mão-de-obra. Exige altos investimentos em equipamentos de grande porte para seu manuseio.

c) Dormente de aço:

Este dormente tem propriedades muito próximas ao de madeira, superando-o no tocante ao baixíssimo impacto ambiental, na melhor ancoragem e na maior vida útil. Esta última é estimada entre 40 e 50 anos, contra os 16 anos da madeira. Em contrapartida apresenta maior propensão a laqueados (depressão no leito da linha onde a água penetra e fica confinada) sob situação de vibrações na linha decorrentes do efeito de martelamento das rodas sobre algum defeito superficial dos trilhos.

d) Dormente sintético:

Dormentes de material sintético, até produtos frutos da reciclagem, têm sido desenvolvidos ultimamente. São normalmente com forma trapezoidal semelhante ao de madeira. Estes materiais têm apresentado ótimas propriedades mecânicas, mas um valor final financeiro muito alto, incapaz de fazer concorrência às demais opções.

O trilho de via férrea é sem margem de dúvidas o componente mais importante da superestrutura. É tecnicamente considerado o principal elemento de suporte e guia dos veículos ferroviários, e economicamente detém o maior custo. É composto por dois perfis metálicos paralelos mantidos pelos dormentes.

A forma e o comprimento evoluíram gradativamente, até atingirem os perfis modernos de grande seção e também seu peso, para permitir as pesadas cargas por eixos dos trens modernos. Um dos fatores que contribuiu para isto acontecer, foi o rápido desenvolvimento da tecnologia do aço.

Os trilhos cumprem duas funções principais: constituem a superfície de rolamento pelo qual trafegam os veículos ferroviários, servindo como guia, e transmitem os esforços decorrentes do movimento do veículo (carga dos eixos, esforços de aceleração e frenagem e esforços devido à variação de temperatura) para a infra-estrutura viária.

Os trilhos requerem a máxima precisão para o alinhamento em planta e nivelamento do perfil longitudinal, assim como adequada sobrelevação para poder permitir altas velocidades e conforto, em tráfego que submete os trilhos a grandes esforços (TOGNO, 1973).

Ao apresentarem defeitos ou desgastes podem ser reaproveitados, observando-se as classificações em função do desgaste sofrido na superfície de rolamento e no canto da bitola do boleto, segundo a NBR 11693. Esta classificação que determina se o trilho pode ser reaproveitado em via principal ou acessória, se pode ser reperfilado ou se deve ser sucateado. A NBR 7599 define uma classificação para os trilhos com defeito, impróprios para uso na via férrea, considerando os tipos e origem desses defeitos com a finalidade de estudo sistemático das ocorrências.

Finalmente, as fixações e seus acessórios são utilizados para firmar os trilhos nos dormentes.

2.4. Perfil do trilho

O perfil básico utilizado em trilhos ferroviários convencionais é o tipo *Vignole*, que é composto por boleto, alma e patim, definido pela NBR 7590 e apresentado na figura 04.

A NBR 7650 define boleto como a parte do trilho destinada ao apoio e deslocamento da roda ferroviária, e alma como a parte do trilho compreendida entre o boleto e o patim. Este é definido como a base do trilho constituída pela massa mais longa do duplo T, através do qual o trilho é apoiado e fixado nos dormentes.

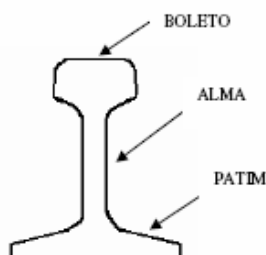


Figura 04 – Perfil Vignole
Fonte: Semprebone (2005)

A classificação dos trilhos é feita pelo peso por metro linear. Se a caracterização de um trilho for TR 68, significa que cada metro dele pesa 68 kg. A AREMA (*American Railway Engineering Association*), uma associação americana ferroviária, padroniza a estampa dos trilhos na sua alma a cada 19" ou 4,9 metros para que por meio desta, seja possível a identificação do **peso** em libras por jardas, **tipo da seção**, **método de eliminação de hidrogênio**, **marca do fabricante**, **ano e mês de laminação** como mostra a figura 05.

No mesmo esquema pode-se observar que existe outro tipo de marcação, existente nos trilhos fabricados por lingotamento contínuo que também ocorre a cada 4,9 metros e representa o **tipo de trilho**, o **número da corrida**, sua **numeração serial**, que representa sua posição no lingote, **número da valeta** onde foi produzido e **número da posição que representa dentro dessa caneleta**.

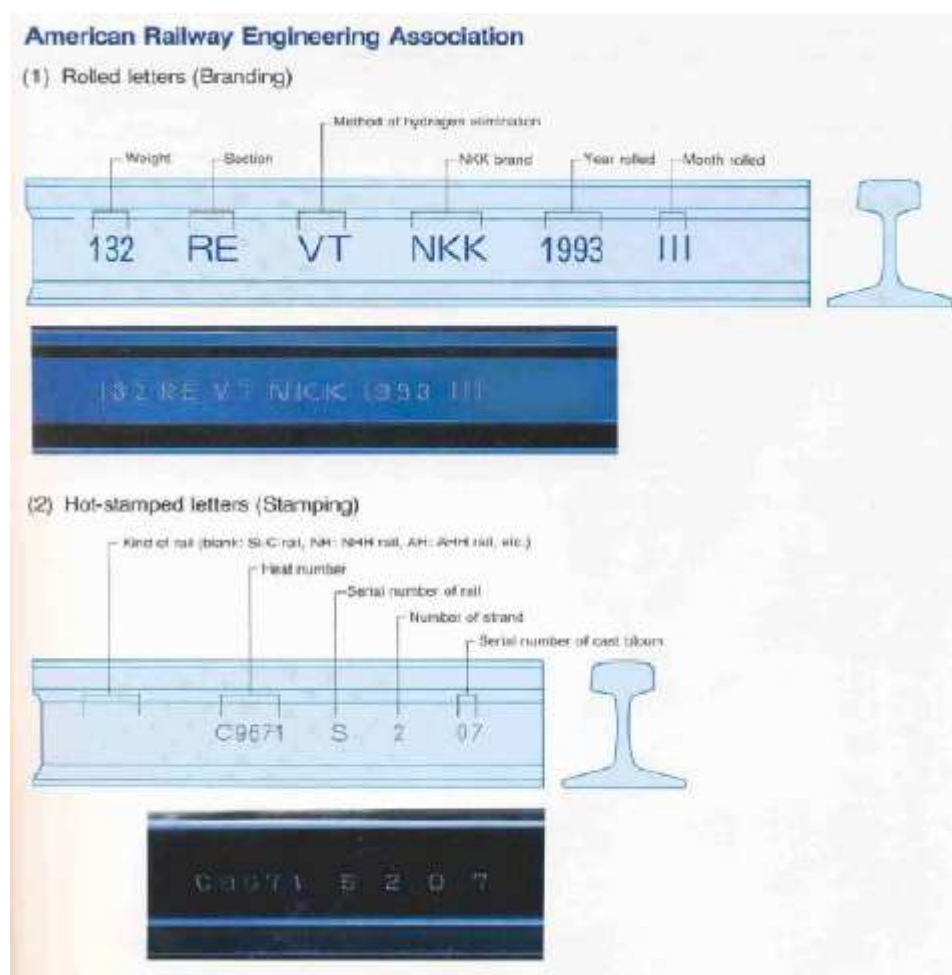


Figura 05 - Padronização da AREMA para a estampa de trilhos

Fonte: MRS PPCM Via (2005)

2.5. Fabricação dos trilhos

2.5.1. Composição do aço para trilhos

Para exercer a sua função de superfície de rolamento e suporte das cargas transportadas pelos veículos, é necessário que o trilho tenha dureza, tenacidade, elasticidade e resistência à flexão. Entre todos os materiais, é o aço o que oferece as melhores vantagens no emprego na fabricação dos trilhos (BRINA, 1979).

Os principais componentes do aço e sua influência nas características fundamentais são:

- Ferro: aproximadamente 98% da composição do trilho é o ferro, constituindo pois como elemento básico do aço. É responsável pelo aumento da resistência mecânica, mas por outro lado, diminui sua ductilidade, sua resistência ao choque e à soldabilidade.
- Carbono: o carbono proporciona maior dureza ao aço, mas à medida que aumenta a sua porcentagem, este pode se tornar quebradiço, principalmente se não for reduzida a porcentagem de fósforo. Portanto, segundo Duval e Magalhães (2006), à medida que é aumentado o teor de carbono no aço do trilho, serão aumentadas a resistência a tração, resistência ao desgaste e dureza. Em contrapartida, irá sofrer redução no alongamento e crescer a fragilidade.
- Manganês: este metal aumenta a forjabilidade do aço, a temperabilidade, o limite elástico e a resistência ao choque, apesar de diminuir a ductibilidade e fornecer ao aço rico em manganês a tendência para trincar durante a fabricação. O manganês encarece muito o preço do aço, sendo empregado principalmente nos trilhos de aço-liga e em peças especiais como aparelhos de mudança de via (AMV).
- Silício: este elemento minimiza o efeito do desgaste e, indiretamente, é benéfico às outras propriedades mecânicas por ser o principal agente desoxidante que ajuda a evitar a formação de bolhas ou inclusões não metálicas.
- Fósforo: tem como principal característica negativa o aumento significativo da fragilidade do aço. Desta forma, para o trilho, o fósforo deve ser considerado um elemento exclusivamente nocivo e prejudicial às propriedades mecânicas desejadas.

2.5.2. Processos de fabricação

A fabricação dos trilhos é composta de vários processos que podem ser diferentes de empresa para empresa, mas basicamente as etapas são:

- 1- Alto forno e tratamento a vácuo;
- 2- Lingoteira ou corrida contínua;
- 3- Reaquecimento e laminador desbastador;
- 4- Laminadores e corte a quente;
- 5- Rolos, prensas e alinhadores;

6- Resfriamento controlado dos trilhos.

De acordo com Brina (1979), a fundição produzida pelos altos fornos é uma liga de ferro com alto teor de carbono, duro, frágil e não maleável. No curso de sua transformação em aço, ao mesmo tempo em que se abaixa o teor de carbono, deve-se eliminar tanto quanto possível as impurezas, como enxofre e fósforo, que se encontram em quantidades variáveis nesta liga.

A tecnologia de fabricação do aço tem evoluído muito, obtendo-se atualmente aços de alta qualidade, tendo em vista a destinação do mesmo.

O aço obtido da concha de fundição é vertido em moldes piramidais de fundo móvel, chamados lingoteiras. Sua seção média é de 50 x 50 cm e contém aproximadamente cinco toneladas de aço. Uma “corrida” dá de quatro a cinco lingotes.

Os fenômenos físico-químicos que se produzem durante a solidificação da liga, na lingoteira, prejudicam a homogeneidade do aço e dão origem a vários defeitos, que poderão prejudicar a peça resultante, quando em serviço. Estes defeitos serão descritos no próximo capítulo.

Os trilhos são laminados a quente, a partir dos blocos provenientes dos lingotes. A seção do trilho é obtida pela passagem sucessiva do bloco aquecido, numa série de cilindros de laminação, projetados de tal modo que a fôrma retangular do bloco é gradualmente desenvolvida na seção do trilho. Esta operação requer precisão de desenho dos diversos contornos dos cilindros e uma supervisão constante na fase de laminação, para obter a seção desejada.

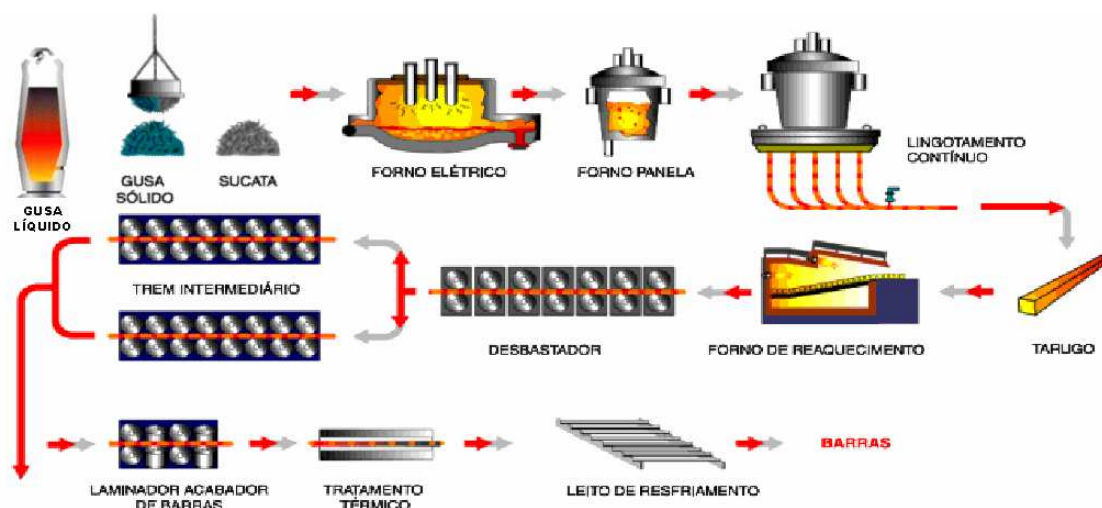


Figura 06 – Processos de fabricação do trilho

Fonte: Arcelor Mital (2008)

Para verificar a qualidade do lote de trilhos recebidos, existem diversos controles, destrutivos e não destrutivos, alguns dos quais são citados abaixo:

- Teste de tração: analisa resistência, extensibilidade e ductilidade;
- Impacto: verifica a formação de trincas;
- Dureza Brinell: método da medição da dureza;
- Entalhe e fratura: trincas, esfoliações, cavidades, matéria estranha, estrutura brilhante, granulação muito fina.

Capítulo III

DESGASTES E DEFEITOS EM TRILHOS FERROVIÁRIOS

3.1. A via férrea, os trilhos e seu desgaste

A superestrutura viária constituída por sublastro, lastro, dormente, trilho e fixações, conforme citado anteriormente no item 2.3, deve cumprir duas funções: constituir a superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários, servindo como guia, além de transmitir os esforços decorrentes do movimento desses veículos para a infra-estrutura viária, sendo o trilho o elemento responsável por cumprir estas duas funções, além de ser parte integrante do sistema de transporte ferroviário, composto de veículo e via. Segundo Rives; Pita e Puente (1977), o trilho, fundamento da via, é o elemento ativo da estrutura ferroviária e está submetido a diversas ações procedentes do material rodante. O contato roda-trilho pode produzir desgastes e fazer surgir defeitos que afetem sua regular utilização.

A via permanente, por isso, deve atender a requisitos mínimos de segurança e conforto e, de acordo com Brina (1979), pode ter seus elementos substituídos quando o seu desgaste atingir o limite de tolerância estabelecido ou quando a intensidade de tráfego, ou ainda quando o aumento do peso do material rodante assim exija.

Nesse sentido, é importante destacar que o desgaste ou defeitos prematuros afetam muito a exploração ferroviária, tendo em vista o custo do material e o de sua substituição, além de comprometerem a segurança, pois uma fratura no trilho pode acarretar acidentes de graves proporções, principalmente em trens de passageiros (BRINA, 1979).

Assim, é de suma importância um significativo conhecimento dos limites de desgaste dos trilhos. Raras são as informações sistematizadas sobre esses limites, sendo que as normas citadas por Brina (1979), Stopatto (1987) e Batist (2002) e aceitas atualmente estabelecem um limite de desgaste de 25% da área do boleto. Este valor não se apresenta claramente explicado ou fundamentado.

Os defeitos dos trilhos constituem também assunto de grande importância na operação ferroviária, por afetarem não somente sua economia como sua segurança.

A economia porque o desgaste ou avarias prematuras marcam pesadamente a exploração ferroviária. Sua segurança porque uma fratura de trilho, consequência de um desgaste excessivo, pode acarretar em acidentes de graves proporções, sobretudo em trens de passageiros.

Estes defeitos podem ser de dois tipos:

- Defeitos de Fabricação;
- Defeitos Originados em Serviço.

3.1.1. Defeitos de Fabricação

a) Vazio (Bolsa de Contratação)

Ocorrem quando dentro da estrutura do trilho ficam espaços (vazios) que surgem como fruto de problemas na etapa de solidificação, ficando uma trinca ou fenda, diminuindo a resistência da peça. É de difícil identificação a olho nu.

b) Segregação

De acordo com Colpaert (1974), o aço dissolve homogeneamente quase todo tipo de impurezas. Ao solidificar, estas impurezas ficam insolúveis e tendem a segregar, diferenciando-se no meio do metal. A esse acúmulo de impurezas nos lingotes e em certas peças fundidas dá-se o nome de segregação. Como a solidificação começa da periferia para o centro é nesta última região que a maior parte das impurezas irão se acumular. Predominam os compostos de fósforo e enxofre, que são de pouca solubilidade no aço sólido, segregando-se à medida que a temperatura cai.

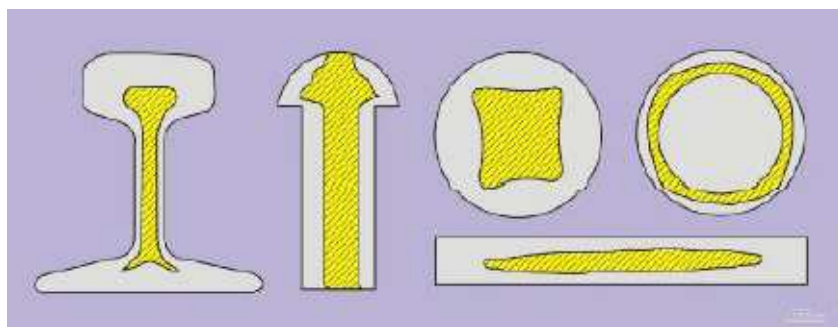


Figura 07 – Segregação do aço

Fonte: Colpaert (1974)

c) Inclusões

Inclusões não metálicas, provenientes da escória do forno, do revestimento da soleira e do revestimento da panela. Particularmente perigosa por ser de difícil descoberta. Fontes potenciais de enfraquecimento do trilho, pela sua presença quebram a homogeneidade do metal.

Existem também inclusões gasosas, devidas aos gases que ficam na massa do lingote.

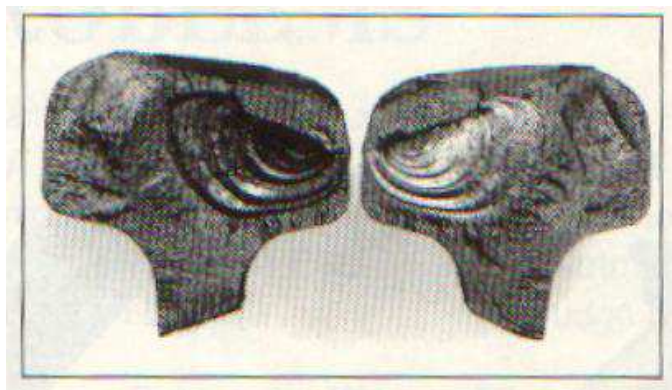


Figura 08 – Defeito causado por sujeira no aço
Fonte: Petroni (2006)

d) Fissuras Transversais

São pequenas cavidades formadas no final da laminação que podem dar origem, posteriormente, quando o trilho estiver sob carga, a uma fratura.



Figura 09 – Trinca transversal
Fonte: Petroni (2006)

e) Defeitos de Laminação

São perceptíveis à simples vista, no fim da laminação e não têm a princípio influência na segurança. Consistem frequentemente em ondulações, rebarbas, pregas, etc.

Os defeitos de fabricação podem, quando o trilho estiver em uso, levá-lo à fratura, o que causa inúmeros prejuízos à via. Os custos de uma fratura de trilho são:

- Inspeções, que podem ser feitas com aparelhos eletrônicos (ultrassônicos/carro-controle) ou visuais (baseados na experiência), no restante da via;

- Atraso de trens, causa grande prejuízo principalmente quando a carga tem prazo de entrega restrito;
- Reparos na linha, trocas de trilhos, talas, solda;
- Descarrilamentos;
- Perda da confiabilidade no transporte ferroviário.

3.1.2. Defeitos originados em serviço

A significância dos defeitos é muito grande, tanto do ponto de vista econômico, quanto para a segurança de circulação, visto que a presença de defeitos nos trilhos faz surgir, ante as cargas de serviço, avarias ou rupturas nos mesmos.

Os defeitos de fadiga por contato de roda são um dos grandes fatores que obrigam os departamentos de via permanente a repor os trilhos nas seções de intenso uso. Este tipo de defeito é mais preocupante em ferrovias tipo *heavy haul* (minério de ferro), de tráfego de cargas pesadas. A incidência de tais defeitos também se encontra nas ferrovias com cargas reduzidas por eixo, mas com uma alta densidade de tráfego de alta velocidade. Estes defeitos são geralmente difíceis de serem percebidos em seu desenvolvimento e têm grande impacto econômico para as ferrovias, entretanto, não será foco deste estudo.

O desgaste dos trilhos tem sido considerado como fator fundamental na economia ferroviária, desde os primeiros anos do século XIX, segundo Rives; Pita e Puente (1977). A busca de uma maior resistência ao desgaste, unida à conservação de outras características físicas, assim como a segurança contra rupturas, têm orientado a evolução do material dos trilhos e dado lugar a inúmeros e recorrentes trabalhos sobre o tema.

O desgaste dos trilhos ferroviários é o que mais ocorre nas ferrovias brasileiras, frente às fadigas de trilhos, como consequência do característico traçado sinuoso das vias. O regime de desgaste geralmente ocorre na face de bitola do boleto de trilhos altos localizados em curvas fechadas, devido à grande força lateral aplicada pelas rodas. Entretanto, também ocorre no boleto de trilhos altos e baixos e de tangente devido ao contato roda-trilho, e a atividades ligadas à manutenção da via como o esmerilhamento.



Figura 10 – Trilho com desgaste

Fonte: Petroni (2006)

A evolução dos desgastes no trilho é típica, sendo que um trilho novo apresenta um ritmo rápido de desgaste devido à existência em sua superfície de uma leve camada descarbonada que é rapidamente eliminada. O material abaixo desta camada é mais rico em carbono e trabalha a frio, assim desenvolve uma película endurecida mais resistente ao desgaste. Embora ocorram mudanças na forma do perfil do boleto, uma forma de equilíbrio é rapidamente atingida e, após isto, o trilho sofre poucas variações ao longo do tempo (RIVES; PITA e PUENTE, 1977).

A determinação do desgaste do trilho pode ser feita comparando-se o desenho da seção transversal do trilho novo com um desgastado.

De acordo com Brina (1979), existem três processos para determinação do perfil desgastado.

O primeiro é através da utilização do perfilógrafo (Figura 11), um aparelho que desenha o contorno da seção do trilho. O segundo é pelo aparelho de Richter e o terceiro por meio de moldes de gesso. O segundo e o terceiro processo estão em desuso.

O perfilógrafo é um aparelho integrado a um computador, que através de um sistema a laser faz a leitura do perfil do trilho, desenhando o perfil desgastado sobre o perfil novo, e fornece dados como o desgaste sofrido e a perda em área do boleto (JUDGE, 2001).



Figura 11 – Perfilógrafo

Fonte: *Laserail*

Segundo Rives; Pita e Puente (1977), os desgastes podem ser divididos em ordinários e ondulatorios. Os ordinários são aqueles que têm por resultado uma variação substancial da forma da seção do trilho. Já, os desgastes ondulatorios se desenvolvem no sentido longitudinal do trilho e sua incidência na forma da seção do trilho é leve, cuja aparição ocorre em caráter periódico.

Os desgastes ordinários são divididos em vertical geral, vertical por plano de roda e por patinação do veículo, deformação plástica na superfície de rolamento do trilho e desgaste lateral.

Os desgastes verticais são causados pela abrasão das rodas e pela corrosão devido às intempéries. A corrosão da superfície de rolamento é a grande responsável pela perda de material, em vias de tráfego muito intenso (RIVES; PITA E PUENTE, 1977).

Os desgastes laterais ocorrem principalmente nas curvas, acentuando-se nas de pequeno raio e também em retas onde há irregularidades na via. Tais desgastes devem-se à pressão horizontal dos frisos das rodas contra a face lateral do boleto.

A soma dos desgastes vertical e lateral resulta no desgaste total.

A deformação plástica começa pela formação de uma ranhura no lado interior do boleto, debaixo da zona coberta pelo friso. Em seguida, se forma uma reborda que sobressai pela parte exterior do boleto. Podem se desprender finas lâminas de aço da superfície de rodagem do trilho, formando lascas que sobressaem pela borda interior do boleto (RIVES; PITA e PUENTE, 1977).



Figura 12 – Deformação plástica

Fonte: Petroni (2006)

O desgaste ondulatorio do trilho, ou corrugação, incluem-se em uma família de fenômenos que constituem um problema para muitas ferrovias (Figura 13).

A corrugação se manifesta como irregularidade periódica ou ondulações que se desenvolvem no trilho, sem que necessariamente haja uma causa comum ou um tratamento único (GRASSIE, 2000).

O desgaste ondulatorio provoca inúmeros efeitos negativos, como: degradação dinâmica da disposição geométrica da via, fadiga dos trilhos com o consequente desenvolvimento e propagação dos defeitos internos, afrouxamento e desgaste das fixações, desenvolvimento de fissuras e quebra dos dormentes, além do efeito negativo nos elementos de suspensão dos veículos por ressonância e aumento substancial da

contaminação sonora ambiental e também no interior do veículo ferroviário, segundo Panades (1996).

Em resumo, o desgaste ondulatório amplia a manutenção requerida na via e nos veículos, aumenta a resistência à tração, submete os trilhos a vibrações, reduzindo o conforto nas viagens, além de provocar uma maior poluição sonora.



Figura 13 – Corrugação claramente visível

Fonte: Grassie (2000)

Esses custos de manutenção afetam muito a exploração ferroviária e, segundo Panades (1996), a Deutsche Bundesbahn - DB (companhia ferroviária alemã) gastou 18 milhões de marcos em 1983 com o esmerilhamento dos trilhos. Em 1985, os custos ocasionados pelo desgaste ondulatório em ferrovias norte-americanas foram estimados em 100 milhões de dólares. Em algumas ferrovias européias comprovou-se que o desgaste ondulatório é causa da substituição de cerca de 10% dos trilhos. O percentual médio de custos de manutenção com o trilho, segundo Magalhães (2000), observados entre 1995 e 1999, na Estrada de ferro Vitória-Minas (EFVM), foi de 31% em relação ao conjunto completo de manutenção da via, sem considerar o investimento na aquisição dos trilhos.

As corrugações são classificadas fundamentalmente pelo comprimento longitudinal de onda e pela amplitude das cristas e cavidades que dependem do tipo de ondulação (PANADES, 1996).

Algumas hipóteses para explicar suas origens limitam-se aos parâmetros do traçado, à frequência de carga, além de deficiências nos processos de fabricação do trilho, valor do módulo de deformação do subsolo, sua capacidade portante e drenagem, ou ainda à existência de asperezas superficiais e irregularidades no trilho, vibrações no sistema via-veículo, variações na rigidez dinâmica da superestrutura, entre outros (PANADES, 1996).

Para Brina (1979), a causa desse desgaste parece ser originada pelas vibrações produzidas nos trilhos, durante a passagem dos veículos, fazendo variar o grau de aderência e pressão nos pontos de contato, o que acarreta uma variação na velocidade

angular da roda e uma série de deslizamentos elementares, que produzem no trilho o desgaste ondulatório.

De todos os fatores intervenientes, o contato entre a roda e o trilho, entretanto parece ser a chave para entender o problema. A estrutura metalográfica do trilho na crista da deformação ondulatória é idêntica à existente quando não ocorre desgaste ondulatório. Esta superfície é brilhante e dura, pois há uma fina camada constituída por martensita na fase branca, característica da superfície de rodagem. Isto é um indicador de que a roda está completamente em contato com o trilho nas cristas das ondas de deformação, não havendo deslizamento. A região dos vales de deformação na superfície do trilho é mais escura e o material tem menor dureza, portanto a ação da roda sobre o trilho é diferente nestas zonas e nas cristas, indicando que deve haver produzido algum tipo de deslizamento da roda para dar lugar ao desgaste (RIVES; PITA e PUENTE, 1977).

A presença de corrugação pode ser detectada através de um carro-controle, que é um equipamento de medição que serve para examinar as condições dos trilhos e dormentes, além da geometria da via permanente. Ele faz o registro dos dados do estado geral da via e de seus elementos. Tal veículo, como o *Track Evaluation Vehicle*, ou Track Star, utilizado pela MRS Logística S.A., pode ser visto na figura 14.



Figura 14 – Carro-controle

Fonte: www.mrs.com.br

A perfeita manutenção da superfície de rodagem é muito importante para evitar o ruído, consequência da corrugação. Rhodes e Shield (1995) afirmam que os níveis de ruído crescem significativamente em trilhos corrugados. Logo, prevenir a corrugação garante uma adequada resiliência do trilho. Em trilhos com a superfície corrugada, segundo Birmann (1981), a intensidade do som a uma distância de 25 metros da via é de 5 a 15 dB (A) maior que em uma superfície perfeita, o que corresponde a aproximadamente o dobro do ruído emitido.

O método mais eficaz para tratar a corrugação é o esmerilhamento do trilho, que é feito com o trem esmerilador. Tal processo é uma efetiva ferramenta de manutenção do trilho, que restaura a superfície de rolamento corrugada e também funciona como

ferramenta de manutenção preventiva, tornando possível às ferrovias controlar o desgaste e uma eventual propagação dos defeitos (TUZIK, 1995).

Outro importante uso do esmerilhamento, caracterizado por Grassie e Kalousek (2000), em algumas circunstâncias refere-se ao reperfilamento transversal do trilho, que não só ajuda a guiar o veículo, reduzindo as forças na curva, diminuindo a probabilidade de corrugação, como também reduz a tensão de contato, particularmente no canto da bitola, minimizando a fadiga de contato rolante e o escoamento plástico.

Reduzidos os defeitos tipo fadiga e o desgaste roda-trilho e melhorando essa interação, podem-se estender os intervalos de esmerilhamento e também reduzir a taxa de remoção de trilho, assim prolongando a sua vida útil, reduzindo os gastos com manutenção (WU, 2004).

3.2. Contato roda-trilho

O contato roda-trilho representa a interação da Via Permanente com os Materiais Rodantes, os quais são os dois itens de maior custo de manutenção da Ferrovia.

Qualquer imperfeição em um destes componentes vai afetar o outro direta e indiretamente e todos os demais componentes da infra e superestrutura da via, gerando um maior custo com manutenção da ferrovia, afetando a confiabilidade do sistema, e aumentando os riscos.

O contato roda-trilho se dá pelo contato direto das rodas do trem com os trilhos, ambos metálicos. Isso provoca um desgaste considerável dessas partes devido à grande magnitude da carga que solicita as rodas.

A zona de contato roda-trilho, segundo Magel (1999), apresenta inter-relações muito complexas, já que envolve mais de 60 variáveis. Muitas destas variáveis estão além do controle da engenharia, porém as mais significativas, como a geometria de contato roda-trilho, podem ser controladas.



Figura 15 – Contato roda-trilho

Fonte: Duval e Magalhães (2006)

Se dois sólidos esféricos, elásticos e ideais, não exercem qualquer pressão entre si, então o contato entre eles se resume a um único ponto. Quando pressionados, um contra o outro, produz-se, na região de contato, uma pequena deformação de configuração elíptica, conforme indicado na figura 16. A distribuição de esforços, dentro desta elipse de contato, não é homogênea e, pelo contrário, se verifica de forma aproximadamente parabólica. A tensão máxima de compressão ocorre na parte central da elipse e sua intensidade se calcula segundo a equação de Hertz (MAGALHÃES, 2000).

Nas ferrovias, segundo Rives; Pita e Puente (1977), o contato roda-trilho gera solicitações em ambos elementos. Esse contato se converte em uma elipse quando a roda atua comprimindo o trilho com uma força igual à carga que suporta (Figura 16).

A tensão de compressão máxima na superfície de contato (s_1), segundo Hertz é calculada pela equação abaixo apresentada por Schramm (1977), sendo Q a carga estática de uma roda sobre a superfície de rolamento do trilho, R o raio da roda e r o raio de arredondamento do boleto.

$$s_1 = 178. ((1/R + 1/r)^2 \cdot Q)^{1/3}$$

A área de contato é definida de forma aproximada, ainda segundo Schramm (1977), pela equação a seguir.

$$f_1 = (2.Q) / s_1$$

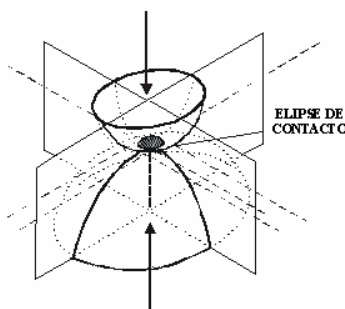


Figura 16 – Superfície de contato roda-trilho

Fonte: Semprebone (2005)

A roda possui um perfil tronco-cônico, que propicia o auto-direcionamento do rodeiro, e um friso que limita os deslocamentos laterais máximos, tocando, em um único ponto, a face lateral do boleto do trilho. O contato duplo se dá quando o rodeiro aproxima-se da extremidade da folga lateral e o friso encosta no flanco lateral do trilho, conforme figura 17 (ESVELD, 1989).

No caso de contato em um único ponto, a carga Q e a força lateral Y atuam no mesmo ponto. No caso de dois pontos de contato, os pontos de aplicação das forças não coincidem (ESVELD, 1989).

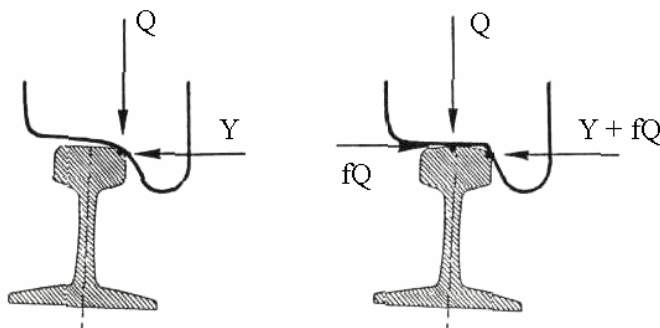


Figura 17 – Contato de 1 ou 2 pontos entre o friso e a roda

Fonte: Esveld (1989)

O desgaste do trilho e das rodas decorrente do atrito faz com que a geometria de contato se altere, podendo comprometer a estabilidade do veículo ferroviário (VILLA, 1993).

A estabilidade do veículo ferroviário é o termo que se refere às interações das forças que surgem quando o veículo se desloca sobre a via (JUNIOR, 1996).

Nesse contato roda-trilho atuam forças permanentes e forças dinâmicas. Essas forças permanentes são forças de atrito, que ocorrem nos pontos de contato das superfícies de rolamento e pontos de contato no canto da bitola, e força centrífuga, quando em curva. As forças dinâmicas são constituídas pela força vertical ($V2$), igual a Q na figura 17, e pela força lateral ($L1$), igual a Y na figura 17.

Para Barbosa (1995), a força vertical ($V2$) resulta do peso próprio do veículo que trafega sobre as irregularidades da via, ou seja, da interação veículo-via. Este valor é majorado por coeficientes dinâmicos. A inscrição do veículo em curva e seu próprio movimento produzem esforços laterais ($L1$). A relação entre estes esforços ($L1/V2$) determina a tendência para a roda descarrilar. É, portanto, um indicador de segurança da via.

Segundo Junior e Rodrigues (1996), modelos matemáticos e experimentos de campo indicaram que, com uma taxa de L/V igual a 0,64, o trilho é forçado para fora. Já a uma taxa de L/V de 0,75, a roda pode subir no trilho desgastado. Tendo L/V igual a 0,82, a roda se eleva do trilho, e com uma taxa de 1,29 a roda pode subir em trilho novo. O valor de 0,8 é o limite aceito, em geral, além do qual a roda começa a se elevar no trilho.

Quando há desgaste do trilho, o ângulo de inclinação da face ativa do trilho é substituído pelo ângulo de desgaste, na prática menor que o ângulo para frisos e trilhos

novos. Isto facilita a condição de escalada das rodas, resultando no descarrilamento, sendo, portanto, essencial o estudo deste ângulo.

Para Magalhães (2002), o ângulo da face ativa do trilho novo (β) (Figura 18) é igual a 60° para que a relação entre os esforços laterais e verticais (L/V ou Y/Q) seja menor ou igual a 0,8, ou seja, o limite crítico para que a roda comece a se elevar do trilho.

Segundo Vidon (43 apud 42), o ângulo de desgaste (δ) (figura 19) é menor que o ângulo da face ativa do trilho novo (β). Com a ocorrência do desgaste, o ângulo δ pode atingir valores inferiores a 50° , tornando críticas as condições de escalada das rodas. Para Esveld (24) o ângulo de desgaste é limitado a 32° para prevenir a subida da roda no trilho.

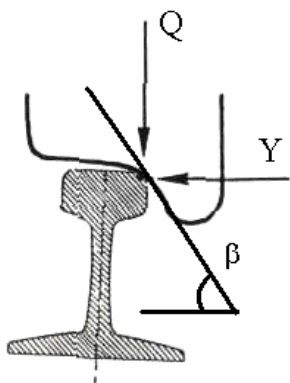


Figura 18 – Ângulo trilho novo
Fonte: Semprebone (2005)

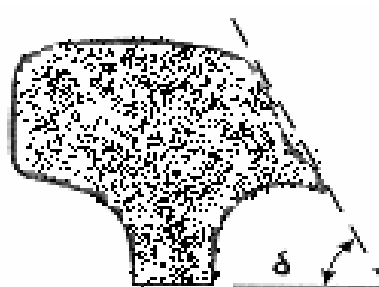


Figura 19 – Ângulo trilho desgastado
Fonte: Semprebone (2005)

Ainda para Magalhães (2002), a pior configuração no contato roda-trilho para o descarrilamento é a associação entre roda nova e trilho com desgaste próximo ao limite último de desgaste lateral. A possibilidade de escalada da roda seria maior nesta situação devido à região de contato. Conforme a figura 20, o contato entre roda e trilho novos se dá na região superior do friso (2), onde o ângulo é maior. Com roda nova e trilho desgastado, o contato ocorre na região inferior do trilho (1), onde o ângulo é menor, reduzindo o limite crítico de $L1/V2$.

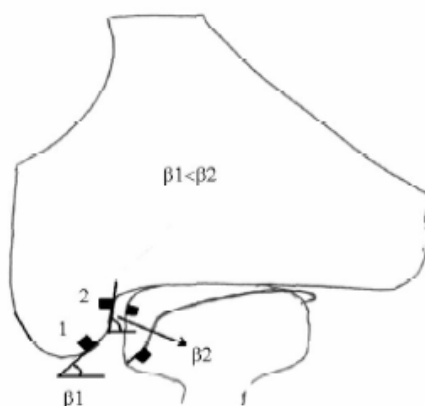


Figura 20 – Roda nova e trilho usado

Fonte: Semprebone (2006)

3.3. Limites de uso do trilho

Do ponto de vista econômico, devido ao alto custo de substituição do trilho, é de grande importância saber até que limite o trilho que sofreu desgaste pode continuar a ser utilizado sem comprometer a segurança da via. Esta é a grande questão a ser respondida.

De acordo com a *Association of American Railroads* (AAR), as ferrovias norte-americanas tinham cerca de 48,5 milhões de toneladas de trilhos instalados em 2001 (Judge, 2001). Para substituir estes trilhos, os custos seriam de 27 bilhões de dólares em aço, não contando os custos de instalação, que poderiam chegar a outros 27 bilhões de dólares.

Segundo Kristan (2004), de 1999 a 2004, as ferrovias adquiriram cerca de 500 mil toneladas de trilho por ano para a devida substituição, a um custo estimado de 1,25 bilhão de dólares. Esta é uma razão significativa para justificar um aprofundamento no estudo da vida útil dos trilhos.

Para Stopatto (1987), o trilho é reaproveitado na outra fila até que seu desgaste total atinja aproximadamente 25% da área do boleto. Em tráfego muito intenso, nem sempre há tempo para esse reaproveitamento, pois pode, segundo uma avaliação objetiva, ter sido atingido o limite de bitola e o de desgaste total. Deve-se lembrar que a bitola não pode ser maior que 1635 mm em qualquer situação de desgaste para evitar descarrilamento por bitola aberta.

De acordo com Brina (1979), várias indicações têm sido adotadas para fixar esses limites. Algumas estradas de ferro admitem, para o desgaste vertical do boleto, o limite de 12 milímetros para linhas principais e de 15 a 20 milímetros para linhas secundárias. Para o desgaste lateral do boleto, admitem que o ângulo de desgaste q (figura 21) possa atingir de 32 a 34°.

A largura do boleto, por sua vez, deve guardar com sua altura uma relação tal que o desgaste lateral não obrigue a substituição do trilho antes que o mesmo tenha atingido o limite de desgaste vertical. A relação $c1/e$ é de aproximadamente 1,6 a 1,8 (figura 22). A relação ideal $h/11$ está entre 1 e 1,1. A perda de peso admitida é de 10% para trilhos até 45 kg/m e 15 a 20% para trilhos mais pesados.

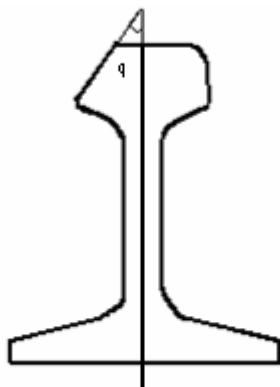


Figura 21 – Desgaste lateral

Fonte: Kowaltowski e Ruschel (1997)

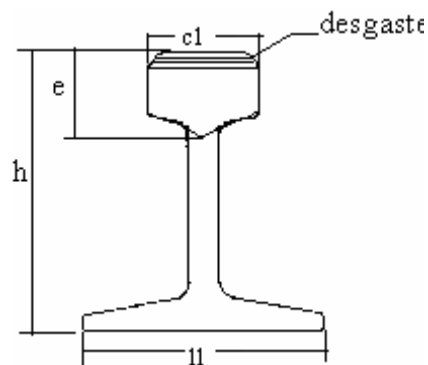


Figura 22 – Desgaste vertical

Fonte: Kowaltowski e Ruschel (1997)

Ainda segundo Brina (1979), de um modo geral, é aceito como limite de desgaste uma perda de 25% da área do boleto.

No caso da Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA), estabeleceu-se por norma (23 apud 4) os limites de desgaste verticais e laterais para o boleto conforme a tabela 01. O valor do desgaste máximo é dado pela soma do desgaste vertical com metade do desgaste horizontal. O trilho deverá ser substituído quando o desgaste máximo total ou o desgaste vertical for atingido.

Tabela 01 – Máximo desgaste do boleto

Tipo de trilho	Tonelagem bruta anual	Desgaste máximo total (mm)	Desgaste máximo vertical (mm)
68	>14	11	-
	2 a 14	13	-
	Até 2	16	14
57	>14	10	10
	2 a 14	12	10
	Até 2	15	10
45	2 a 14	10	6
	Até 2	11	6
37	2 a 14	10	5
	Até 2	13	5

Fonte: RFFSA (23 apud 4)

É estabelecido pela RFFSA que o desgaste máximo não poderá ultrapassar 25% da área do boleto e que o desgaste lateral não poderá atingir a superfície inferior do boleto ou superior a tala de junção. As bitolas, larga e métrica, não poderão exceder 1,620m e 1,020m respectivamente.

Um gabarito manual era usado pela RFFSA para verificação do desgaste laterais do boleto (Figura 23). Se a face A se ajustar ao boleto indica que 12% do desgaste foi atingido. Se a face B se ajustar ao boleto, 17% do desgaste foi atingido. A face C se ajustando ao

boleto significa que 25% do desgaste foi atingido, devendo proceder-se a substituição do trilho.

Os valores de L1 e L2 da figura 23 necessários à confecção dos gabaritos são estabelecidos por norma em função do tipo de trilho.

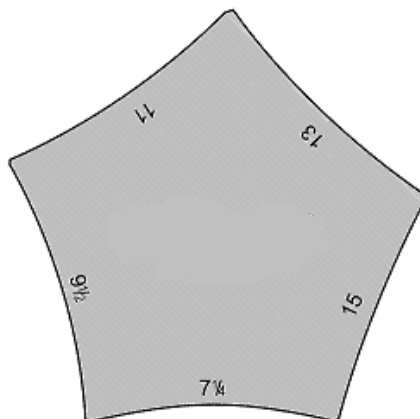


Figura 23 – Esquema do gabarito de desgaste do boleto de trilhos

Fonte: www.kinman.com

A *American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association* (AREMA) elaborou uma tabela apresentando os limites de desgaste para trilhos de segunda-mão, conforme tabela 02 .

Tabela 02 – Limite de desgaste do boleto para trilhos de segunda-mão

Vias de utilização	Perfil de trilho	Máximo desgaste vertical (mm)	Máximo desgaste horizontal (mm)	Observações
1. Vias principais	TR- 68	5,6	12,7	Admitidas mínimas queimas por patinação e corrugações.
	TR- 57	3,2	7,9	
	TR - 45	3,2	3,2	
2. Ramais principais	TR- 68	10,3	19,1	Admitidas pequenas queimas por patinação e corrugações.
	TR- 57	7,9	19,1	
	TR - 45	6,4	4,8	
3. Ramais secundários	TR- 68	15,1	22,2	Admitidas queimas por patinação e corrugações médias e oxidadas.
	TR- 57	9,5	19,1	
	TR - 45	7,9	7,9	
4. Pátios	TR- 68	16,7	25,4	Admitidas queimas por patinação e corrugações quaisquer, contanto que não tenham fraturado o trilho.
	TR- 57	12,7	22,2	
	TR - 45	9,5	9,5	

Fonte: Branco e Ferreira (2002)

Segundo Roney (2001), a *Canadian Pacific Railroad* (CPR) faz o gerenciamento dos desgastes dos trilhos TR- 57 e do TR- 68 conforme reproduzido nas figuras 24 e 25.

Estas figuras são muito práticas de consultar. Com as medidas dos desgastes vertical e horizontal do trilho, encontra-se uma região na figura, permitindo-se analisar o destino que se dará ao trilho em consequência do desgaste sofrido. Pode-se ter que inverter o lado do trilho, trocá-lo, substituir trilhos curtos e antigos, substituir trilhos longos e soldados ou sucateá-los.

Algumas ferrovias somente mudam o trilho quando foi perdido mais que 10 mm de sua superfície (Judge, 2001). Ou podem substituí-lo quando este perde 50% em área do boleto. Segundo os estudos do *Transportation Technology Center Inc.* (TTCI), cada ferrovia faz esta substituição diferenciadamente.

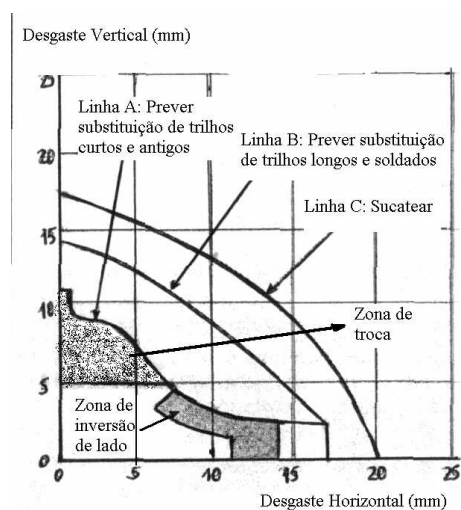


Figura 24 – Gerenciamento do TR-57

Fonte: Branco e Ferreira (2002)

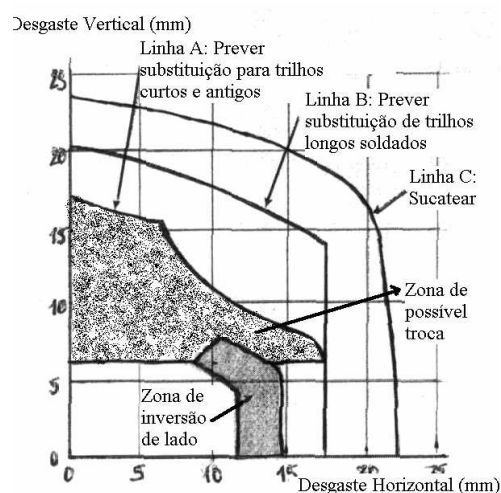


Figura 25 – Gerenciamento do TR-68

Fonte: Branco e Ferreira (2002)

Pesquisas, nesse sentido, têm sido desenvolvidas para estender os limites de desgaste do trilho a partir do desenvolvimento de perfis que otimizem a interação roda-trilho. Tem-se concluído que os limites de desgaste podem ser aumentados com estratégias a serem implantadas na via, a longo prazo, para controle do desgaste. Algumas das medidas que vem sendo tomadas visando o aumento da vida útil dos trilhos são:

- Adoção de trilhos de maior resistência ao desgaste;
- Esmerilhamento de sua superfície de rolamento visando à redução das cargas dinâmicas solicitantes através de uma melhor área de contato.

O aumento da vida útil pode ser atrelado ao benefício econômico quando os procedimentos de esmerilhamento são bem planejados, o que inclui desenhar apropriadamente o perfil, escolher o adequado procedimento de esmerilhamento e monitorar a interação roda-trilho.

3.4. Esmerilhamento

Ao longo dos anos, três tipos de esmerilhamento foram desenvolvidos: corretivo, de manutenção e preventivo (KALOUSEK e MAGEL, 1997).

O esmerilhamento corretivo requer remoção substancial de metal através de múltiplos passes do trem esmerilador em velocidade baixa para remover defeitos e corrugação.

A técnica de esmerilhamento de manutenção, por sua vez, serve para remover defeitos de superfície e reperfilar o trilho. Dependendo das condições do trilho podem ser necessários de um a três passes do trem esmerilador.

E, finalmente, o esmerilhamento preventivo, que é feito com um único passe do trem esmerilador para se remover somente uma camada de material, a fim de se controlar a fadiga de superfície. Esse esmerilhamento preventivo produz um acréscimo significativo na vida útil do trilho, um decréscimo nos níveis de ruído e retarda a ocorrência de corrugação do trilho, permitindo ainda que se estabeleça um perfil particular para cada trecho, melhorando o contato roda-trilho, reduzindo o consumo destes e diminuindo os custos.

Segundo Kalousek e Magel (1997), várias ferrovias norte-americanas têm utilizado o esmerilhamento preventivo que, em conjunto com um programa efetivo de lubrificação, reduz a fadiga e o desgaste.

A ferrovia canadense *Canadian Pacific Railway* (CPR) acumula extensa experiência com estratégias de esmerilhamento, que incluem o não-esmerilhamento, o esmerilhamento corretivo e o esmerilhamento preventivo, este introduzido a partir de 1993. Conforme Sroba, Magel e Prah (2003), com dados de 2003, o custo com a substituição de trilhos por ano foi de 81 milhões de dólares, em que era empregado o não-esmerilhamento, e de 68 milhões de dólares com a técnica do esmerilhamento corretivo, resultando numa economia de 13 milhões de dólares por ano com a substituição de trilhos, enquanto o custo anual com o esmerilhamento corretivo foi em torno de 8 milhões. Já o custo com a substituição de trilhos empregando técnicas de esmerilhamento preventivo foi de 65 milhões de dólares por ano, representando uma economia de 16 milhões de dólares, se comparado ao custo anual com o não-esmerilhamento. Como o custo com o esmerilhamento preventivo foi de 7,5 milhões de dólares por ano, a taxa custo-benefício foi maior que 2, mostrando a vantagem econômica do emprego desse procedimento.

Conforme Stanford e Kalousek (2000), o *National Research Council of Canada's* (NRC) *Center for Surface Transportation Technology* desenvolveu um método de esmerilhamento gradual-preventivo implantado pela equipe de manutenção da *Burlington Northern Santa Fé* (BNSF). As tensões de contato roda-trilho tornaram-se objetos de estudo e perfis de trilho otimizados foram desenvolvidos com as tensões de contato roda-trilho controladas. O esmerilhamento foi feito em três estágios: para correção do perfil, para

impedir a iniciação de fraturas e para remover as fraturas inativas. Depois de testes em várias ferrovias, comparados ao método tradicional após um ano de implantação do programa, obtiveram-se 3,3 milhões de dólares de economia com a redução do metal desgastado nas curvas e o conseqüente acréscimo de vida útil dos trilhos.

Esveld (1989) define dois métodos para aplicar o esmerilhamento do trilho: com rotação e com oscilação longitudinal. Como resultado do movimento, o material do trilho é desgastado e há uma adaptação no trilho, tornando-o uniforme. São utilizados trens esmeriladores para fazer esse esmerilhamento, como o da MRS Logística (Figura 26), a GWM 220 e a Speno (Figura 27).



Figura 26 – Trem esmerilador MRS

Fonte: www.mrs.com.br

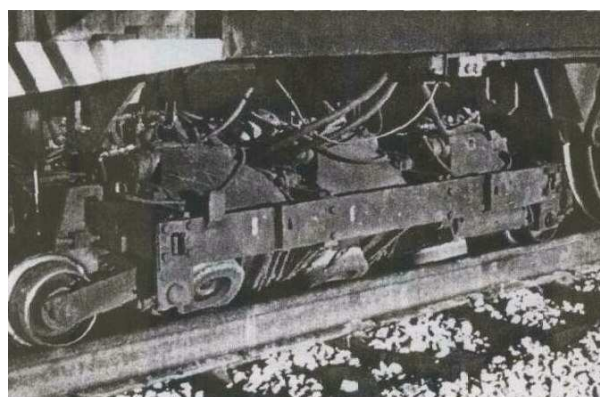


Figura 27 – Trem esmerilador Speno

Fonte: Semprebone (2005)

Um procedimento adequado a trilhos por onde trafegam veículos de cargas pesadas é o esmerilhamento assimétrico, por meio do qual o ponto de contato roda-trilho é modificado para dentro do trilho alto e para fora do trilho baixo. Isto propicia melhor direção, diminuindo o problema do desgaste lateral e corrugação (ESVELD, 1989).

Além das ferrovias citadas, *Canadian Pacific Railway* e *Burlington Northern and Santa Fé*, outras que empregam as melhores técnicas de esmerilhamento do trilho são: desde 2000 a *Union Pacific*, desde 2001 a CSXT, desde 1989 a australiana BHP *Billiton*, desde 1995 a *Queensland Rail*, desde os anos 90 a brasileira Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e a sulafricana Spoornet, e desde 2002 a *Network Rail* do Reino Unido (SROBA, MAGEL e PRAHL, 2003).

De acordo com Tuzik (1995), a produção de aço de alta dureza e alta qualidade, a lubrificação efetiva e o esmerilhamento do perfil do trilho, quando aplicados isoladamente aumentam restritamente a vida útil do trilho. Juntos, oferecem potencial para uma ampliação considerável em sua durabilidade.

A lubrificação dos trilhos também pode reduzir seu desgaste, além de evitar o desgaste da face da bitola.

A lubrificação tem-se mostrado ser um dos menos onerosos caminhos para aumentar a vida dos trilhos em curvas fechadas. Dependendo das circunstâncias, um aumento de 50% na vida do trilho tem sido atribuído apenas ao uso de lubrificação. Com isso, porém, os trilhos se tornam mais suscetíveis à fadiga. Assim, o esmerilhamento é ainda mais eficiente para controlar estes defeitos (TUZIK, 1995).

Segundo Roney e Meyler (2001), com estas medidas, os novos limites de desgaste subiram de 25% de perda em área do boleto para de 35 a 40%. Verificou-se que os limites prolongados não aumentam o risco de falha, mas, além destes limites, o trilho se desgastava muito rapidamente, podendo ocorrer fratura nele. O conhecimento exato da condição de desgaste do trilho, todavia, permitiu prever com exatidão o momento certo de substituição do trilho. Com isto, o custo foi reduzido, possibilitando um aumento da carga por eixo da via.

A vida útil do trilho também pode ser associada à perda de peso dele em função do número de toneladas que solicitam os mesmos. Essa abordagem, porém, não será tratada neste trabalho, pois o objeto de estudo é justamente a perda em área do boleto. Estudos complementares poderiam ser desenvolvidos em eventuais futuras pesquisas.

3.5. Exemplo prático de defeito de desgaste

Conforme mencionado anteriormente, um assunto de grande importância na operação ferroviária, refere-se à segurança. Na década de 50 e início da de 60, o número de acidentes ferroviários eram frequentes. As condições de segurança da tripulação dos trens eram precárias e a via permanente demandava uma alta gama de investimentos.

Com o desenvolvimento da economia, o sistema ferroviário se torna um importante modal no país, principalmente para o transporte de cargas e, dessa forma, é necessário que a segurança da via seja preservada, mantendo a integridade e a confiabilidade do sistema.

A via permanente, por isso, deve atender a requisitos mínimos de segurança e conforto e, de acordo com Brina (1979), pode ter seus elementos substituídos quando o seu desgaste atingir o limite de tolerância estabelecido ou quando a intensidade de tráfego, ou ainda quando o aumento do peso do material rodante assim exija.

Entretanto, devido ao alto custo envolvido, com frequência estes requisitos mínimos não são cumpridos.

Será apresentada, com base no tema abordado ao longo deste trabalho, a ocorrência de um descarrilamento de cinco vagões no dia 3 de julho do ano de 2008, cuja causa principal foi desgaste excessivo dos trilhos. Os dados verificados no local do acidente foram:

- Posição: Km 554+776; lado esquerdo (interno);
- Tipo do trilho: TR - 68;

- Planimetria: Terraplenagem (Corte);
- Geometria: Curva de 312 metros de raio / Rampa: 0,743%;
- Estampa: CSN Brasil RC SM TR-68 (1982) N AL;
- Corrida: Não Ident. - Letra: Não Ident. - Lingote: Não Ident.;
- Mês / Ano: Não Ident. / 1982;
- Fratura em solda em balanço;
- Solda antiga e sem identificação;
- Trinca Longitudinal;
- Trilho não invertido;
- Fratura próxima aos furos com solda;
- Trilho com desgaste excessivo (37%);
- Lastro altamente contaminado e dormentação travada.



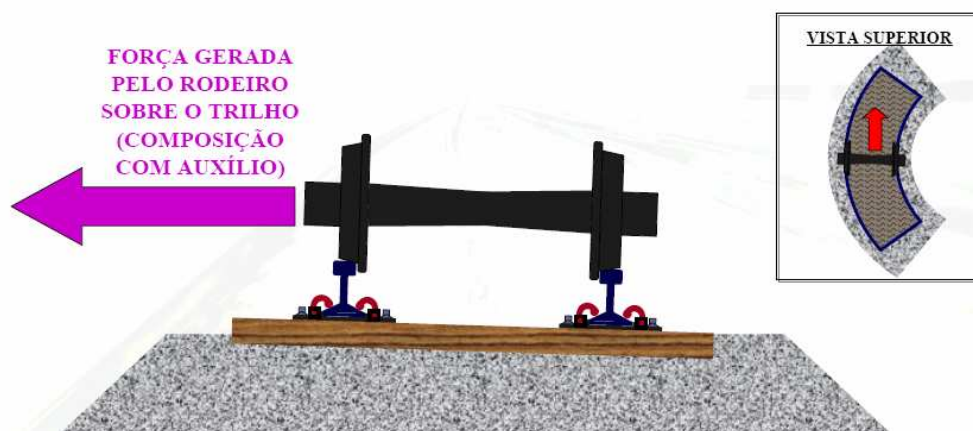
Figura 28 – Trilho desgastado

Fonte: Grupo de Acidentes – MRS (2009)

Observa-se claramente, que algumas medidas preventivas não foram tomadas de modo a evitar que o acidente ocorresse. A principal delas seria a não inversão do trilho diante do excessivo desgaste do mesmo (37%). Outras constatações foram levantadas pela equipe responsável por analisar a causa do acidente. Seriam elas:

- A fratura originou-se no boleto devido à forte força do contato roda trilho fora do eixo do trilho;
- A fratura ocorreu devido à fadiga do material (trilho excessivamente amassado devido tempo de trabalho somado ao lastro excessivamente contaminado da região);
- Não existem registros de ultrassom para esta linha (a contaminação por minério inviabiliza a passagem de veículos rodoferroviários, incluindo o Carro-controle).

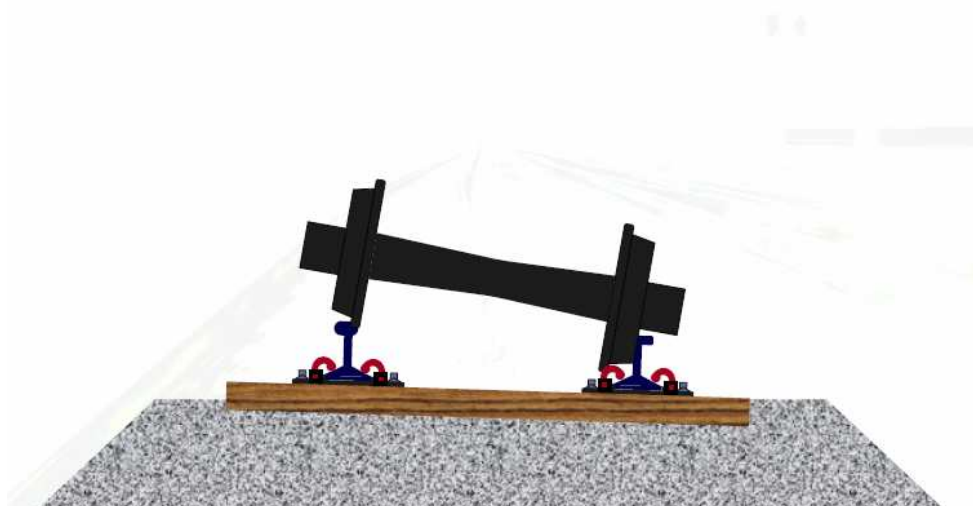
Em seguida, será apresentada uma simulação referente à dinâmica do descarrilamento.



• CONTATO RODA TRILHO NA EXTREMIDADE DO BOLETO JÁ AMASSADO E FORA DO EIXO DO TRILHO.



RODEIRO FICA CONFINADO ENTRE OS TRILHOS FAZENDO COM QUE A RODA DO TRILHO EXTERNO SUBA NO BOLETO DESTE TRILHO.



RODA EXTERNA ULTRAPASSA O TRILHO EXTERNO TERMINANDO O
EVENTO DO DESCARRILAMENTO.



Figura 29 – Simulação de um acidente ferroviário

Fonte: Grupo de Acidentes – MRS (2009)

Capítulo V

CONCLUSÃO

A proposição deste estudo consistiu em analisar o desgaste do boleto dos trilhos frente ao intenso tráfego de trens e seus limites de tolerância para substituição. Com este objetivo, realizou-se uma série de revisões bibliográficas em artigos, teses e livros publicados acerca do assunto e a abordagem do “estado da arte” sobre o conhecimento envolvido na elaboração do trabalho.

Para Stopatto (1987), o trilho é reaproveitado na outra fila até que seu desgaste total atinja aproximadamente 25% da área do boleto. De um modo geral, segundo Brina (1979), é aceito como limite de desgaste uma perda também de 25% da área do boleto.

É estabelecido pela Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) que o desgaste máximo não poderá ultrapassar 25% da área do boleto e que o desgaste lateral não poderá atingir a superfície inferior do boleto ou superior a tala de junção.

Segundo a American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA), os trilhos deveriam ser substituídos em vias principais quando seu desgaste resultasse numa perda de 16%, mas poderiam ser utilizados em ramais principais até um limite equivalente à perda de 38%, em ramais secundários até 41% e em pátios até 51%, ou seja, valores muito acima dos 25%.

A Canadian Pacific Railroad (CPR) prevê a troca dos trilhos quando a perda em área do perfil é menor que 25%. Os trilhos a serem sucateados apresentam perda maior que 25%.

O ângulo de descarrilamento proposto por Esveld (1989) para o trilho TR-57 resultou numa perda de exatamente 25% em área do boleto.

Portanto, pode-se concluir que o valor de 25% utilizado pelo meio ferroviário não está fundamentado em nenhum dos limites estabelecidos pelos autores estudados.

Foram ainda apresentados os principais elementos que constituem a via férrea, assim como as funções, processo de fabricação e características técnicas do material, e, ainda, explicou-se como se dá o contato roda-trilho. Objetiva este trabalho, dessa forma, servir como base para principiantes na área ferroviária.

Apresenta ainda, este trabalho, os principais defeitos e desgastes que afetam os trilhos, assim como sua prevenção e tratamento. Foram levantadas as pesquisas que têm sido feitas para atenuar estes problemas, podendo ser motivador para o estudo de outros pesquisadores.

Finalmente, a contribuição mais significativa deste trabalho foi mostrar que o valor adotado como limite de desgaste pelo meio ferroviário não está fundamentado nos limites de

desgaste impostos pelos autores estudados, o que leva a concluir que este limite pode ser um valor aleatório e não estar adequado à realidade ferroviária. Isso possibilita rever os critérios para o limite de substituição dos trilhos.

Considera-se, portanto, que os objetivos propostos neste estudo, que eram avaliar se o limite de desgaste adotado está adequado à realidade ferroviária, foram integralmente atingidos através das análises realizadas.

Como recomendações para futuros estudos, sugerem-se o desenvolvimento do estudo da evolução da perda do boleto ao longo da vida útil do trilho, a avaliação da evolução das perdas dos boletos em trilhos reperfilados, o estudo da relação das perdas laterais com a parcela da folga da bitola, além de eventuais estudos complementares sobre o desgaste das rodas e o estudo sobre como a mudança na conformação do boleto afeta sua estabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991. **NBR 7590: trilho “Vignole”**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982. **NBR 7599: trilho com defeito**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982. **NBR 7650: trilho**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991. **NBR 11693: trilho “Vignole” e acessórios - reaproveitamento**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977. **NBR 12206: trilho “Vignole” e acessórios - escolha**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. **NBR 7640: defeitos de trilhos utilizados para via férrea**. Rio de Janeiro.

BARBOSA, R., 1995. **Dinâmica do rodeiro na inscrição de curvas**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE OPERAÇÃO, CONDUÇÃO, SEGURANÇA E INTEGRAÇÃO NOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS, Curitiba. Anais. Curitiba, p. 33-45.

BATIST, M., 2002. **Resumo das normas de via permanente da RFFSA com influência na questão do descarrilamento**. In: BRANCO, J. E. S. C.; FERREIRA, R. (ed.). Tratado de estradas de ferro. Rio de Janeiro, v.2, p. 256-266.

BIRMANN, F., 1981. **Rail flaws from operating stresses and their effects**. In: FASTENRATH, Fritz. (Ed.). Railroad Track: theory and practice. Tradução de Walter Grant. New York: Frederick Ungar Publishing CO, p.256-295.

BOSCH, R., 2002. **Rail grinding strategies on Netherlands Railways**. Rail Engineering International. Num. 1, vol. 31.

BRANCO, J. E. C.; FERREIRA, R., 2002. **Projetos-tipo para o sistema roda-trilho em ferrovias heavy haul**. In: BRANCO, J. E. S. C.; FERREIRA, R. (ed.). Tratado de estradas de ferro. Rio de Janeiro, v.2, p. 145 -157.

BRINA, Helvécio Lapertosa, 1979. **Estradas de ferro**. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A.. 1ed. Rio de Janeiro.

COLPAERT, Hubertus, 1974. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Editora Edgard Blucher. 3 ed. São Paulo.

DUVAL, Ernani; MAGALHÃES, Paulo C. Barroso, 2006. **Programa para capacitação em superestrutura ferroviária**, Apostila, Belo Horizonte.

Estrada de Ferro Central do Brasil. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org>>. Acesso em maio de 2009.

ESVELD, C., 1989. **Modern railway track**. Tradução de Julie Page. West Germany: Graphics Department of Thyssen Stahl AG.

GRASSIE, S.; KALOUSEK, J. **Rail corrugation: causes and cures**. Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review. New York, p. 24-26, jul. 2000.

GUIMARÃES, C. A., 1999. **Análise das solicitações dinâmicas na via férrea através da simulação da interação entre o veículo e a via**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

História da Estrada de Ferro Central do Brasil. Disponível em <<http://www.aenfer.com.br>>. Acesso em maio de 2009.

JUDGE, T. **Measuring up- automated technologies lead to better railroad tracks**. Railway Age. New York, set. 2001.

JUDGE, T. **The search for longer rail life**. Railway Age. New York, mar.2001.

JUNIOR, W. V.; RODRIGUES, C. M. O., 1996. **Descarrilamentos de causas não evidentes investigação e prevenção**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MATERIAL

RODANTE VIA PERMANENTE E SEUS ACESSÓRIOS, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro, p. 305-330.

KAESS, G., 1981. **Measurement of corrugations and undulations for quality control and for determining the most economical time for rail grinding.** In: FASTENRATH, Fritz. (Ed.). *Railroad Track: theory and practice.* Tradução de Walter Grant. New York: Frederick Ungar Publishing CO, p. 296-314.

KALOUSEK, J.; MAGEL, E. **Rail profile grinding: heavy-haul and freight applications.** *Railway Track and Structures.* New York, jul. 1997.

KRISTAN, J. **Investigation of metallurgical fundamentals of rail wear: TTI studies rail-steel microstructure and micromechanical properties to further rail performance and possibly derive safety benefits.** *Railway Track and Structures.* New York, ago. 2004.

MAGALHÃES, P. C., 2000. **Contato Roda-Trilho.** In: BRANCO, J. E. S. C.; FERREIRA, R. (Ed.). *Tratado de estradas de ferro.* Rio de Janeiro, p. 80-111.

MAGEL, E. **Optimizing wheel, rail profiles.** *Railway Track and Structures.* New York, jul. 1999.

PAIVA, C. E.L., 1999. **Superestrutura ferroviária.** 2. ed. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.

PANADES, J.M., 1996. **El desgaste ondulatorio del carril: um fenómeno complejo por conocer todavia em su totalidad.** BOLETIN de la ASOCIACION DEL CONGRESO PANAMERICANO DE FERROCARRILES. Buenos Aires, nº 334, p. 73-99.

PETRONI, Caio de Vilhena, 2006. **Estudo da Performance dos diversos tipos de trilhos assentados na via da MRS, critérios de desgaste, fadiga de contato.** Monografia de Especialização. Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro.

PIELLI, J.; SROBA P.; MAGEL E. **Rail Grinding on Amtrak Northeast Corridor.** *Railway Track and Structures.* New York, jun. 2004.

PTR 2501 – Ferrovias, 2004. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Apostila.

REDE FERROVIÁRIA FEDERAL S.A., 1990. **Normas e instruções gerais de via permanente**. Defeitos de trilhos.

RFFSA. **Norma IVR – 15: reemprego de trilhos**. Rio de Janeiro, 1991.

RHODES, D.; SHIELD, B. **Noise becomes a key environmental issue**. Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review. New York, p. 52, jun.1995.

RIVES, F. O.; PITA, A. L.; PUENTE, M.J.M., 1977. **Tratado de ferrocarriles I via**. Madrid: Rueda.

RONEY, M. D.; MEYLER, D. K. **CPR's long-term strategy pays off**. Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review. New York, p. 55-58, set. 2001.

SCHRAMM, G., 1977. **Técnica e economia na via permanente**. Tradução de Rudy A. Volkmann. Porto Alegre: Emma.

SEMPREBONE, Paula da Silva, 2005. **Desgastes em Trilhos Ferroviários – Um estudo Teórico**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – São Paulo.

SROBA, P.; MAGEL, E.; PRAHL, F. **Getting the most from rail grinding**. Railway Track and Structures. New York, dez. 2003.

STANFORD, J.; KALOUSEK, J. **Preventive-gradual rail grinding pays dividends**. Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review. New York, p.25-26, mar. 2000.

STOPATTO, S.,1987. **Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.

TOGNO, F., 1973. **Ferrocarriles. Naucálpan: Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A.**

Trem Esmerilhador e Carro Controle. Disponível em <<http://www.mrs.com.br>>. Acesso em maio de 2009.

TUZIK, R. E. **Extending rail life in North America**. Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review. New York, p.55-58, jun. 1995.

VIDON, W.; MAGALHÃES, P.; DANIEL, V.; SONJA, L., 2002. **Determinação da causa do descarrilamento de trens e prevenção**. Apostila, Belo Horizonte.

VILLA E. C., 1993. **Inscrição de um veículo ferroviário em curva**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

WU, H. **Two key aspects in rail grinding-effectiveness and efficiency; researchers look at the effectiveness and efficiency of rail grinding to prolong rail life and reduce maintenance costs**. Railway Track and Structures. New York, dez. 2004.