

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
SECRETARIA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

CAIO DE VILHENA PETRONI

**ESTUDO DA PERFORMANCE DOS DIVERSOS TIPOS DE
TRILHOS ASSENTADOS NA VIA DA MRS, CRITÉRIOS DE
DESGASTE, FADIGA DE CONTATO**

**Rio de Janeiro
2006**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
ACADEMIA MRS

CAIO DE VILHENA PETRONI

**ESTUDO DA PERFORMANCE DOS DIVERSOS TIPOS DE TRILHOS
ASSENTADOS NA VIA DA MRS, CRITÉRIOS DE DESGASTE,
FADIGA DE CONTATO**

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Transporte Ferroviário de Carga.

Orientador: Prof.: André Pinto – D. C.
Co-orientador: Célia Maria

Rio de Janeiro

2006

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

ACADEMIA MRS

CAIO DE VILHENA PETRONI

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Transporte Ferroviário de Carga.

Orientador: Prof.: André Pinto – D. C.

Co-orientador: Célia Maria

Aprovada em 23 de Agosto de 2006 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof^a. Vanea Gouveia Barcelos Campos – D. C. do IME

Prof^a. Maria Cristina de Fogliatti Synai – D. C. do IME

Prof. André Pinto – D. C. do IME

Prof^a. Célia Maria - MRS

**ESTUDO DA PERFORMANCE DOS DIVERSOS TIPOS DE TRILHOS
ASSENTADOS NA VIA DA MRS, CRITÉRIOS DE DESGASTE,
FADIGA DE CONTATO**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	08
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	08
1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	09
1.3 OBJETIVO	09
2 TRILHOS	10
2.1 IDENTIFICAÇÃO DOS TRILHOS.....	11
2.2 FABRICAÇÃO DOS TRILHOS.....	13
2.3 AÇOS PARA TRILHOS.....	17
2.4 SUBSTITUIÇÃO DE TRILHO.....	23
2.4.1 CRITÉRIO POR DESGASTE.....	23
2.4.2 CRITÉRIO POR FADIGA	23
2.4.3 CRITÉRIO POR REJEITO.....	23
2.5 MEDIDAS DE DESGASTE.....	23
2.5.1 ÁREA DO BOLETO DESGASTADA OU AMASSADA, MEDIDA EM PORCENTAGEM DA ÁREA TOTAL DO BOLETO.....	24
2.5.2 PERDA LINEAR NO CANTO DE BITOLA E NA ALTURA DO BOLETO.....	24
2.5.3 ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DESGASTADA.....	25
2.6 TOLERÂNCIAS	25
2.6.1 TRILHOS NÃO TRANSPOSTOS.....	25
2.6.2 TRILHOS TRANSPOSTOS.....	26
2.6.3 TRILHOS REPERFILADOS OU ESMERILHADOS.....	26
3 CONTATO RODA-TRILHO	27
3.1 CORRUGAÇÃO E DEFORMAÇÃO PLÁSTICA.....	38.
3.2 DIFERENÇA DE RAIOS NO CONTATO.....	41
4 AVALIAÇÃO ECONÔMICA	42
4.1 LIMITES DE DESGASTE E FADIGA NA FERROVIA DO AÇO.....	45
4.2 LIMITES DE DESGASTE E FADIGA NA SERRA DO MAR.....	47
4.3 CUSTOS DE ESMERILHAMENTOS.....	49

4.3.1 QUANTIDADE DE CICLOS.....	49
4.3.2 CUSTO DO CICLO DE ESMERILHAMENTO.....	49
4.4 LCC (LIFE CICLE COST) CUSTO DO CICLO DE VIDA.....	50
4.4.1 LCC FERROVIA DO AÇO.....	50
4.4.1.1 CÁLCULO PARA SITUAÇÃO DE DESGASTE.....	51
4.4.1.2 CALCULO PARA SITUAÇÃO DE FADIGA.....	51
4.4.2 LCC SERRA DO MAR.....	52
4.4.2.1 CÁLCULO PARA SITUAÇÃO DE DESGASTE.....	52
4.4.2.2 CALCULO PARA SITUAÇÃO DE FADIGA.....	53
5 CONCLUSÃO.....	54
6 ANEXO.....	56

RESUMO

As ferrovias têm diferentes características, pois podem ser usadas para transporte de passageiros ou carga. A MRS logística é uma ferrovia com uma malha de 1.674 quilômetros, que transporta carga, principalmente minério de ferro, produtos siderúrgicos, cimento, bauxita, carvão, produtos agrícolas e coque. Localizada na região sudeste do Brasil atende os portos de Sepetiba, Rio de Janeiro, Guaíba e Santos margens esquerda e direita. Ao longo da malha da MRS logística existem diversos tipos de trilhos, fornecidos por diferentes fabricantes, e que tem um desempenho ao longo de sua vida distinto. Entre estes estão os trilhos recém adquiridos pela empresa, de última geração e que prometem uma melhor performance.

O melhor conhecimento dos tipos de trilho e seus critérios de desgaste e fadiga facilitam a identificação de como escolher o tipo de trilho ideal para cada trecho, levando em consideração a quantidade de carga por eixo que passa, a inclinação, perfil da linha e outros. Na escolha do tipo de trilho a ser escolhido deve ser considerado não apenas o desempenho do trilho, mas também o preço, através de uma análise como a LCC (*life cycle cost*, custo do ciclo de vida) onde é possível avaliar os fatores mencionados e ainda os custos de esmerilhamento.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O trilho representa o ativo de maior custo de manutenção da ferrovia, por isso ao longo dos anos, estudos vêm sendo realizados para a sua melhor utilização. A forma atual recebe o nome do seu idealizador *Vignole*, e o material utilizado na composição química vem mudando junto com a necessidade das ferrovias em transportar cada vez mais carga, o que exige que o trilho resista a um maior número de passadas de rodas e peso maior.

Ao longo da malha ferroviária da MRS logística, pode-se encontrar trilhos com características distintas, de diversos fabricantes, tamanhos e composições químicas, o que faz com que cada trilho tenha um desempenho diferente. Entre estes, estão os trilhos recém adquiridos pela empresa MRS logística, de última geração e que prometem um melhor desempenho.

A vida útil de um trilho varia em função de fatores como número de passadas de rodas, condições de infra e super-estrutura da via, clima, peso exercido pelos eixos do material rodante, bem como seu estado. Dentre as condições da via, a inclinação, raio e quantidade de curvas estão entre os principais fatores determinantes do seu desempenho.

Com isso, vem a necessidade do melhor entendimento do desempenho dos trilhos da malha ferroviária e os critérios de avaliação da vida baseados em desgaste ou fadiga, a fim de otimizar o uso diminuindo perdas e balizando a escolha de trilhos.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

O trilho é um item fundamental na ferrovia e para otimizar o seu uso são necessários estudos de sua vida útil e formas de desgaste e fadiga, pois a segurança e a eficiência devem sempre ser mantidas.

Podemos encontrar na Via Permanente da MRS diversos tipos de trilhos, de diferentes fabricantes e datas de aplicação, mas apesar disso os critérios de desgaste e as causas de falhas ainda não são bem definidos.

1.3 OBJETIVO

O estudo visa obter um melhor conhecimento do desempenho dos trilhos, seus critérios de desgaste e fadiga, a fim de facilitar a identificação da necessidade de trilhos de acordo com os trechos da Via da MRS.

2 TRILHOS

Trilho segundo a norma ABNT-TB-52(1068), é um perfil de seção transversal especial, destinado a formar a pista de rolamento dos veículos do tipo ferroviário. O trilho sustenta os veículos ferroviários, transmitindo os esforços das rodas aos dormentes, além de guiá-las ao longo da via através do contato do friso. Devido a esse contato com as rodas destes veículos, principalmente o friso, o trilho está sujeito ao desgaste e à fadiga.

A primeira vez que o trilho apareceu foi no século XVII, desenvolvido pelo Engenheiro Beaumont para evitar que carroças ficassem atoladas no interior de minas, e eram feitos de madeira. Já no século seguinte, os trilhos passaram a ser fabricados de ferro e a forma foi variando até chegar à atual, proposta por *Vignole*, que facilitou a produção em larga escala. Tal tipo de trilho, usado mundialmente até os tempos atuais, é dividido em três partes: Boleto, Alma e Patim descritos abaixo e na Fig. 2.1:

- Boleto: parte sobre a qual a roda se apóia e se desloca, constituindo a superfície de rolamento da via.
- Alma: parte esbelta do trilho situada entre o boleto e o patim.
- Patim: é a base do trilho, constituindo a mesa onde o trilho se apóia e é fixado ao dormente.

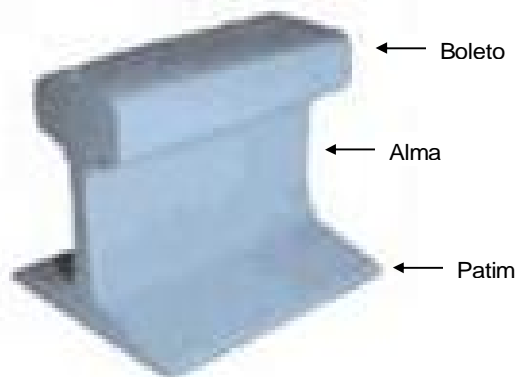


Fig. 2.1 -Trilho de Vignole

2.1 IDENTIFICAÇÃO DOS TRILHOS

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 Fig. 1.2.

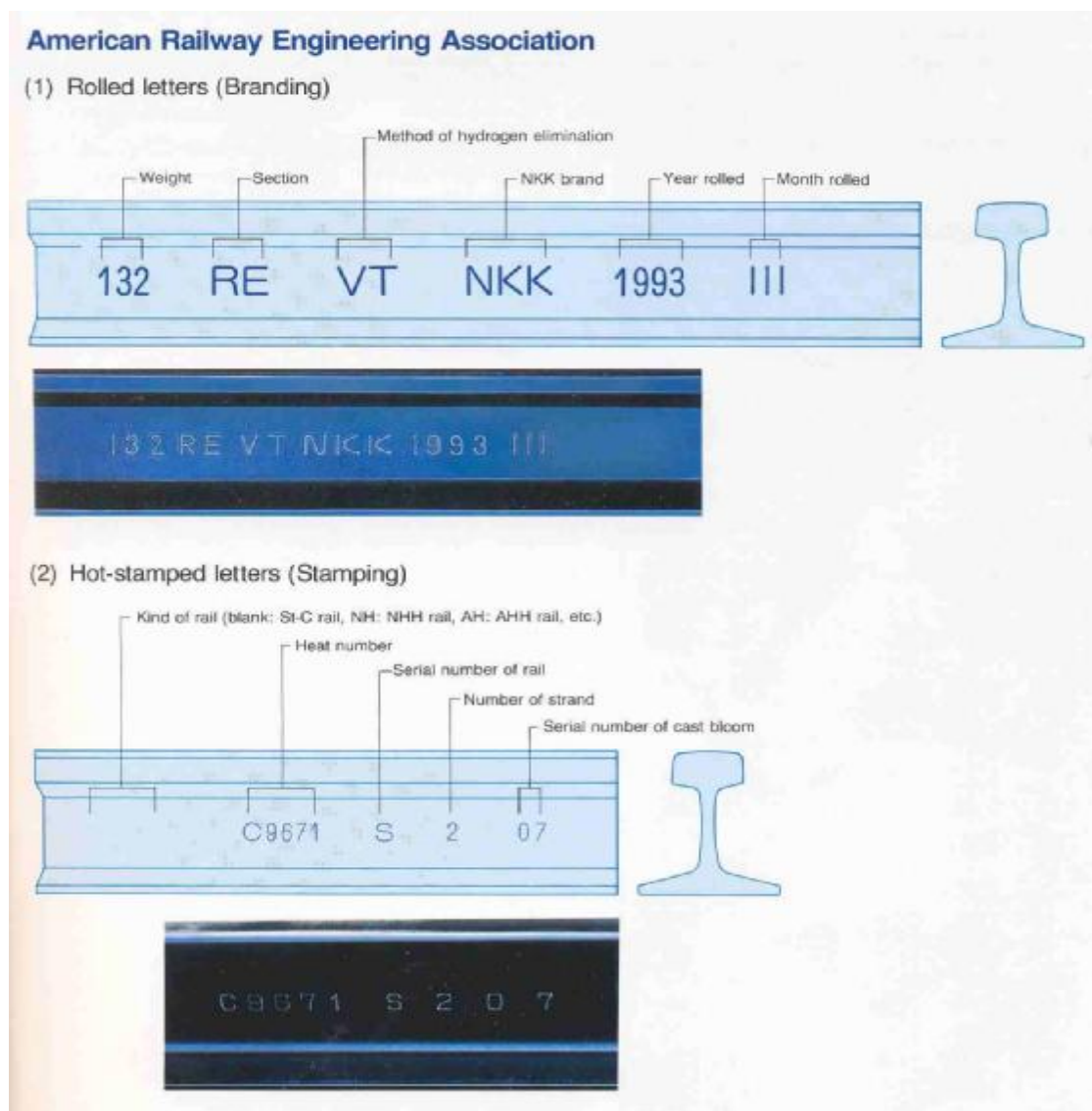


Fig. 1.2 Padronização da AREMA para a estampa de trilhos Fonte: MRS PCM Via

No mesmo esquema pode-se observar que existe um 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 caneleira**. Tal padronização mostrada na figura não é utilizada por todos os fabricantes de trilhos.

Alguns dos trilhos existentes na linha da MRS logística são: Corus, Aceralia, Nippon, DHH, CSN e Huta – Katowice (Polônês). O único destes fabricado no Brasil é o da CSN, no entanto a produção já foi interrompida. O trilho Polônês só foi aplicado na Ferrovia do Aço e está sendo substituído aos poucos, pois tem apresentado inúmeros defeitos de fadiga que não são detectáveis pelo Ultra-som, ferramenta usada pelas ferrovias para detectar defeitos nos trilhos. Atualmente a MRS logística tem como fornecedores Corus, Aceralia e DHH. A relação incluindo todos os trilhos já usados pela MRS logística e suas propriedades mecânicas e composições químicas estão demonstradas em tabela no Anexo 1

A identificação dos diversos modelos de trilhos geralmente é feita usando-se um número que é a resistência em Dureza Brinell e uma sigla que pode ser uma das mostradas na figura 2.3, junto com o significado.

SS, HH, LA, IH, or LH
(Rail Type)
SS = Standard Strength
HH = Head Hardened
LA = Low Alloy Standard Strength
IH = Low Alloy Intermediate
LH = Low Alloy Head Hardened

Fig. 2.3 – Significado de algumas siglas de identificação dos trilhos

2.2 FABRICAÇÃO DOS TRILHOS

A fabricação dos trilhos é composta de vários processos que podem ser diferentes de empresa para empresa, mas basicamente as etapas são as contidas na fig. 2.2:

- 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

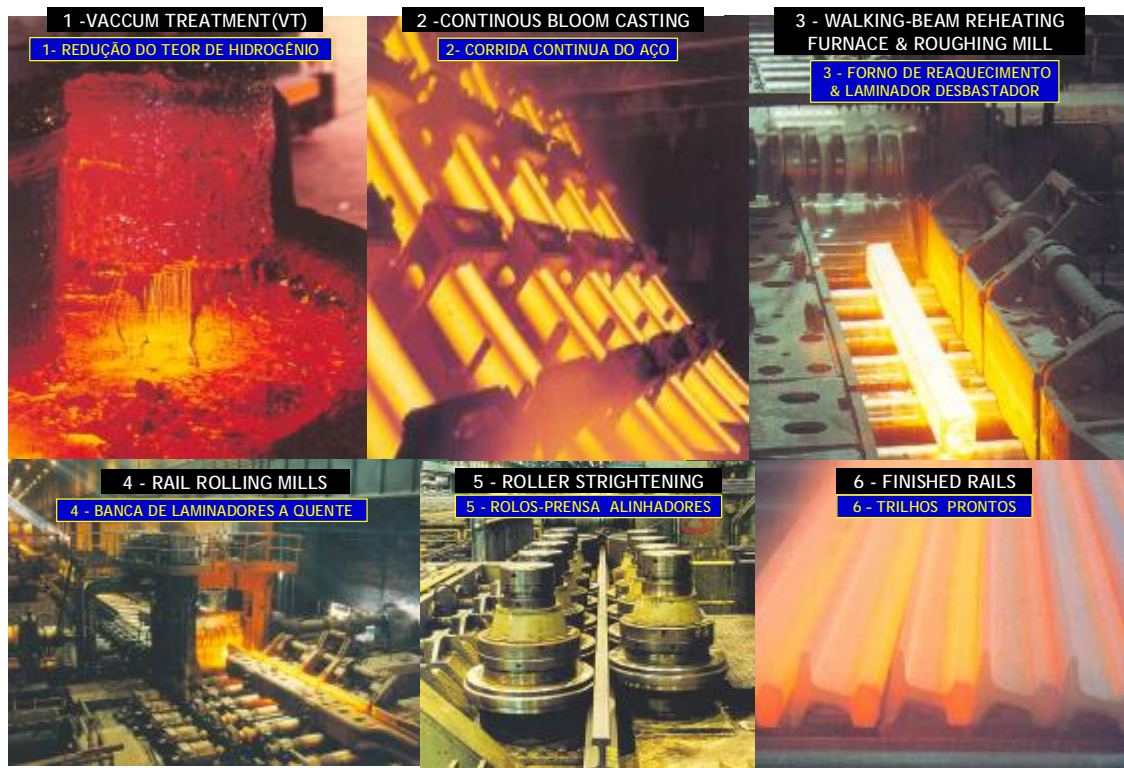


Fig. 2.2 - Processos de fabricação do trilho Fonte: Ch. Vidon 2005

Os trilhos atuais são produzidos por lingotamento contínuo e o aço usado na fabricação costuma possuir os seguintes elementos:

- Carbono (C)
- Manganês (Mn)
- Silício (Si)
- Fósforo (P)
- Enxofre (S)
- Cromo (Cr)
- Nióbio (Nb)

Um elemento que pode causar problemas na composição do aço e deve ser eliminado é o hidrogênio, pois suas bolhas quando em maiores proporções podem causar microtrincas, por isso o teor de hidrogênio não deve passar de 1,5 ppm (partes por milhão). A eliminação do hidrogênio é obtida através do resfriamento controlado ou tratamento de desgaseificação a vácuo. (MAGALHÃES - 2000)

O fósforo (P) e o enxofre (S) são elementos residuais e nocivos, portanto devem ser mantidos em níveis muito baixos, em geral inferior a 0,035% de fósforo, que se acumula no contorno e confere fragilidade ao aço diminuindo sua tenacidade, e inferior a 0,037%, de enxofre, que forma inclusões de sulfeto de manganês que diminuem a tenacidade à fratura e resistência à fadiga. (MAGALHÃES - 2000)

O carbono (C) é o principal elemento endurecedor do aço, no entanto compromete quando seu teor é aumentado a tenacidade do material. Funciona como um estabilizador da fase austenítica, além de proporcionar temperabilidade (Pinto 2006).

O cromo em excesso pode dificultar a soldabilidade dos trilhos, o que aumenta o número de fraturas em soldas.

A integridade estrutural do trilho pode ser comprometida por inúmeros mecanismos de fadiga, falta de resistência mecânica, eventual fragilização, plasticidade localizada e desgaste excessivo. Estes dependem de interações entre

parâmetros de projeto, propriedades do material e do ambiente. (BHADESHIA - 2002)

Além das falhas devidas ao desgaste por uso, os trilhos estão sujeitos também às falhas que ocorrem na fabricação e no projeto. (Pinheiro – 19XX):

- Vazios; ocorrem quando dentro da estrutura do trilho ficam espaços que surgem como fruto de problemas na etapa de solidificação.

- Segregação; ocorre quando certos elementos se separam dos outros e acumulam-se em uma determinada região, isso ocorre quando não existe um bom controle durante a solidificação, na Fig. 2.3 ilustração de matérias com segregação.

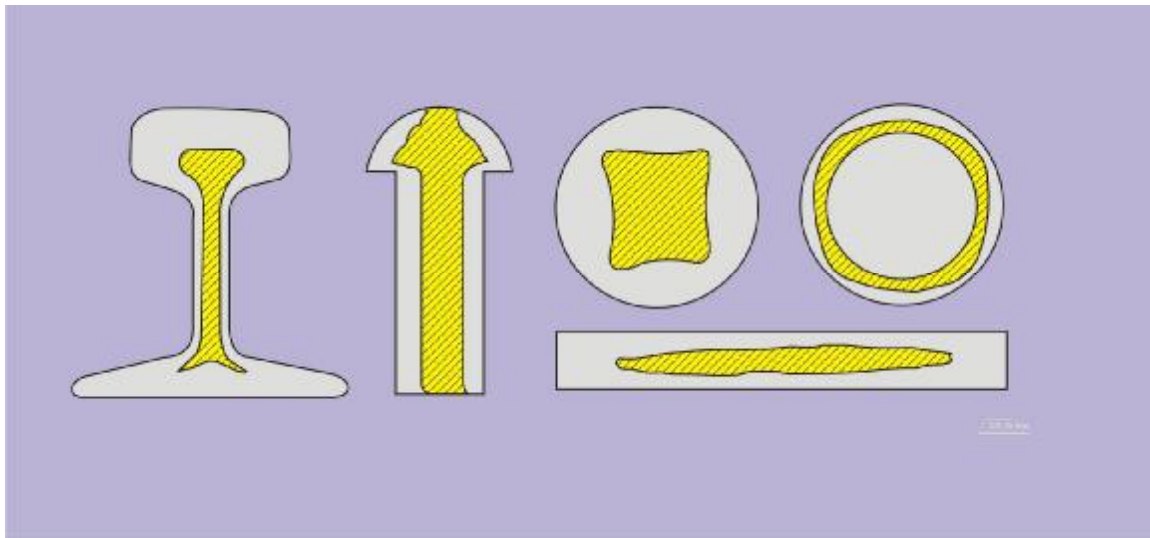


Fig. 2.3 - Segregação do aço (Fonte: Ch. Vidon 2005)

- Inclusões sólidas; ocorrem quando se juntam ao aço alguns outros materiais, agregados do molde ou escória na fase líquida, “sujando o aço”. Na fig. 2.4, exemplo de defeito causado por inclusões sólidas no processo de fabricação dos trilhos.

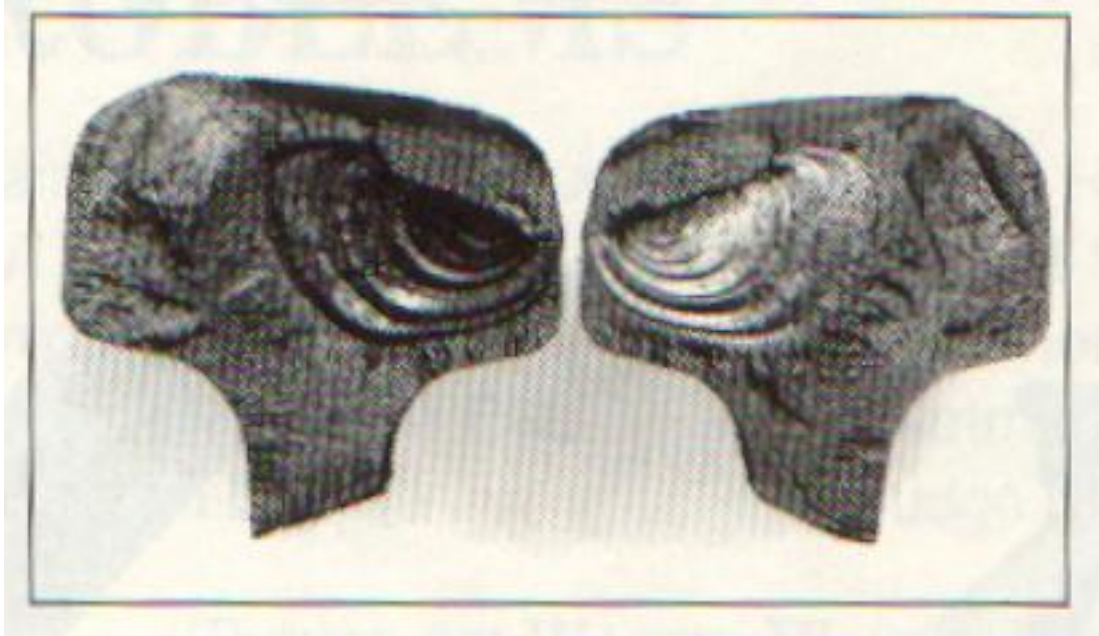


Fig. 2.4 - Defeito causado por sujeira no aço Fonte: Ch. Vidon 2005

- Inclusões gasosas; ocorrem quando existe uma falha no processo de eliminação dos gases usados no processo de acearia do trilho.

- Fissuras transversais; são típicas em trilhos fabricados a partir de lingote. Na fig. 2.5 corte de trilho com fissura transversal.



Fig. 2.5 - Trinca transversal Fonte: Ch. Vidon 2005

- Defeitos de laminação; ocorrem na fase de laminação dos trilhos

Os defeitos de fabricação podem, quando o trilho estiver em uso, leva-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 (ultrasônicos/*track star*) ou visuais (baseados na experiência), no restante da via;
- Atraso de trens, causam grande prejuízo principalmente quando a carga tem prazo de entrega restrito;
- Reparos na linha, troca de trilho, talas, solda.
- Descarrilamentos
- Perda da confiabilidade no transporte ferroviário

2.3 AÇOS PARA TRILHOS

Os aços para os trilhos vêm evoluindo ao longo dos anos especialmente devido ao constante aumento na demanda de transporte de carga, principalmente *Heavy haul*, que é geralmente composto por cargas de baixo valor agregado e alto peso específico, em grande volume e frequência. Esse tipo de carga tem exigido da ferrovia vagões com maior capacidade, trens com elevado número de vagões e maior frequência de viagens, menor tempo gasto com manutenção, melhor previsibilidade e confiabilidade, menos interferência nas comunidades e inferior número de acidentes.

Para compreender melhor a formação dos trilhos deve-se conhecer as fases microconstituíntes do aço.

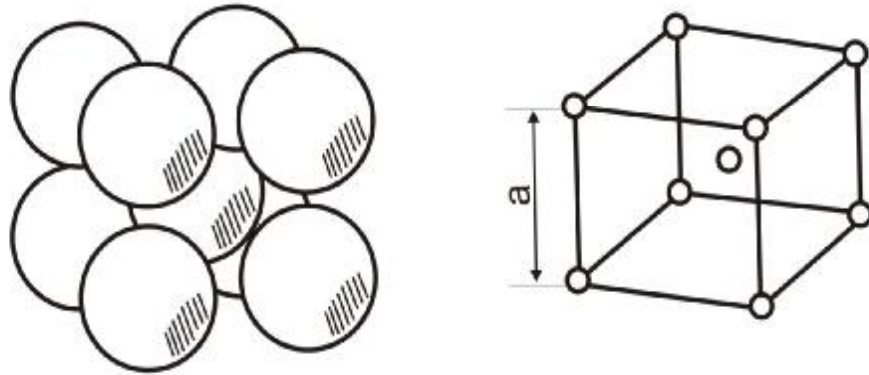
Segundo Pinto 2006 “Os processos de fabricação alteram a microestrutura dos materiais, sendo muitas vezes até mais importantes do que a composição química, e é esta microestrutura que controla as propriedades exibidas pelos materiais”. Na fig. 2.6 é mostrado algumas Fases do Ferro junto com suas estruturas e características.

FASES E MICROCONSTITUINTES DOS AÇOS E SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS		
Fase/Micro-constituente	Estrutura	Características
FERRITA (a)	CCC	Fase dúctil/baixa resistência. Fase estável
FERRITA (d)	CCC	Fase estável a alta temperatura
AUSTENITA(g)	CFC	Fase estável a alta temperatura/dúctil
CEMENTITA	Ortorrômbica	Fase metaestável/alta dureza/frágil
MARTENCITA	TCC	Fase dura metaestável micro-constituente duro, mistura de ferrita e cementita em escala fina

Fig 2.6 - Microconstituíntes do Aço

A ferrita, Fig. 2.7, é o ferro (Fe) na fase CCC (Estrutura Cúbica de Corpo Centrado), que é uma fase estável, dúctil e de baixa resistência. Nesta fase o carbono tem baixa solubilidade no ferro. Na estrutura CCC existe em um cubo formado de átomos de ferro um átomo no centro. Os átomos de carbono ocupam espaços intersticiais nesta rede.

Estrutura Cúbica de Corpo Centrado Ferro Alfa - CCC



**Um átomo de Fe em cada Vértice do Cubo
+ um átomo de Fe no Centro
Ferro Alfa - CCC**

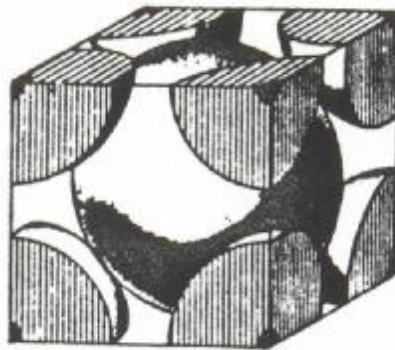
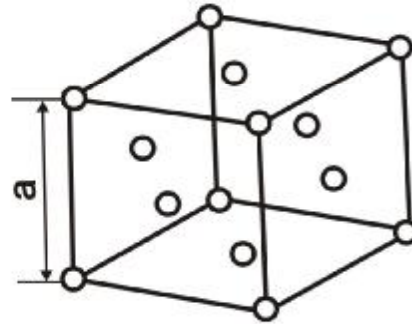
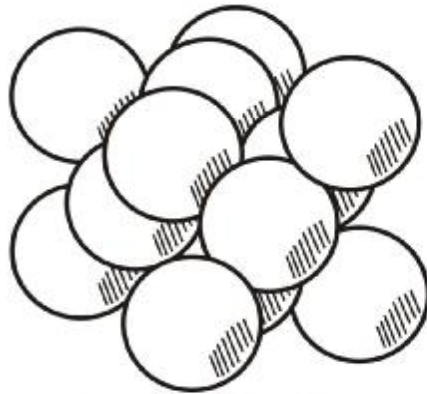


Fig. 2.7 - Estrutura da Ferrita Fonte: Ch Vidon 2006

A austenita, Fig. 2.8, é o ferro (Fe) na fase CFC (Estrutura Cúbica de Face Centrada), e é capaz de dissolver muito mais C do que a ferrita. Embora dúctil a austenita apresenta grande encruamento quando deformada. Fase estável a alta temperatura e dúctil.

Estrutura Cúbica de Face Centrada Ferro Gama - CFC



**Um átomo de Fe em cada Vértice do Cubo
+ um átomo de Fe em cada Face
Ferro Gama - CFC**

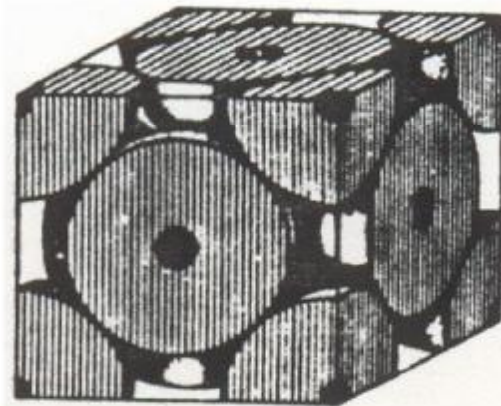


Fig 2.8 - Estrutura da Austenita Fonte: Ch Vidon 2006

Cementita é composta do ferro junto com o carbono, formando carboneto de ferro (Fe_3C) de estrutura ortorrômbica.

Boa parte dos trilhos comuns atuais apresentam microestrutura perlítica especiais, que consistem em uma mistura em forma de lamelas de ferrita e cementita. A ferrita é macia, o que oferece plasticidade ao trilho, enquanto a cementita é dura e relativamente frágil, oferecendo resistência ao desgaste.. A

dureza aumenta quando os espaços entre as lamelas diminuem e também quando a parte de cementita contida na perlita aumenta. Deve-se notar que se, por um lado a cementita aumenta a dureza, por outro, deixa a peça menos resistente. (BHADESHIA - 2002) Na Fig. 2.9 visão microscópica da estrutura perlítica



Fig. 2.9 - Estrutura Perlítica Fonte: Ch. Vidon 2006

Como visto, para modificar o desempenho dos trilhos pode-se alterar tanto a composição química como a microestrutura. Os trilhos para o futuro que prometem uma melhor resistência a fadiga de contato (RCF) são os bainíticos, Fig. 2.10, cuja microestrutura não é laminar e é constituída de cementita em plaquetas precipitadas sobre agulhas de ferrita, esta estrutura refinada em escala pequena proporciona alta tenacidade e maior resistência mecânica.

Em estudos feitos por Kristan e Sawley 2003 sobre trilhos Bainíticos eles concluem:

- Trilhos Bainíticos podem ser produzidos por métodos convencionais usando resfriamento natural após o rolamento. Com química adequada, não é necessário complexos tratamentos térmicos.

- É possível produzir trilhos bainíticos com dureza acima de 400 HB (Brinel) e com uma resistência a fratura acima do que é comum em trilhos perlíticos HH.

- Em teste feitos em escala real a performance dos bainíticos foi boa.

- A resistência ao desgaste do trilho bainítico, comparado com o HH perlítico ainda não pôde ser comprovada, mas parece que o bainítico pode ao menos oferecer a mesma resistência ao desgaste que a do HH perlítico.

- A performance à fadiga de contato do trilho bainítico parece ser superior à dos perlíticos, nos testes em escala real e em pequena escala mostraram melhor resistência à RCF (Rolling Contact Fadigue) cracks e spalls do que o aço perlítico HH.

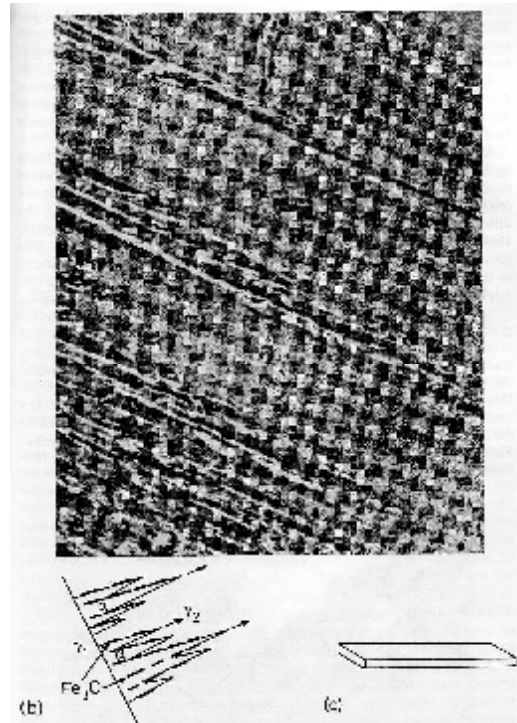


Fig. 2.10 - Estrutura Bainítica Fonte: Ch. Vidon 2006

2.4 SUBSTITUIÇÃO DE TRILHOS

A substituição de trilhos na MRS logística hoje é feita como decorrência processo de inspeção visual apoiado por relatórios do TEV (Veículo usado na MRS logística para avaliar sobre diversos parâmetros as condições das vias) e obedecendo aos seguintes critérios:

2.4.1 CRITÉRIO POR DESGASTE

Trilho externo de curva - desgaste lateral no canto de bitola do boleto.

Trilho interno de curva e de tangentes - perda de altura no centro do boleto (amassamento).

2.4.2 CRITÉRIO POR FADIGA

Ocorrência de defeitos no canto ou no topo do boleto, tanto nos trilhos de curvas ou tangentes que provocam vibrações com a perda da condição de socaria da linha ou comprometimento das fixações.

2.4.3 CRITÉRIO POR REJEIÇÃO

Presença de vários pontos de patinação de rodas, de reparação impossível.

Contatação de diversas uniões por soldas ou talas de junção na mesma barra, provocadas por fraturas de trilhos, podendo ocorrer em curvas ou tangentes. (PROSPECÇÃO 1998 – COMISSÃO DE TRILHOS)

2.5 MEDIDAS DE DESGASTE

O desgaste de trilhos pode ser avaliado por três diferentes processos: área do boleto desgastada ou amassada, perda linear no canto de bitola e na altura do boleto e ângulo de inclinação da superfície desgastada.

2.5.1 ÁREA DO BOLETO DESGASTADA OU AMASSADA, MEDIDA EM PERCENTAGEM DA ÁREA TOTAL DO BOLETO

Para saber a porcentagem da área desgastada do boleto (D%) deve-se medir a área desgastada do boleto (a), dividir pela área total do boleto (A) e multiplicar por 100, como mostra a Fig. 2.10.

a = área desgastada do boleto, A = área total do boleto, A' = área remanescente

$$D\% = a / A \times 100$$

$$D\% = \frac{A - A'}{A} \times 100$$

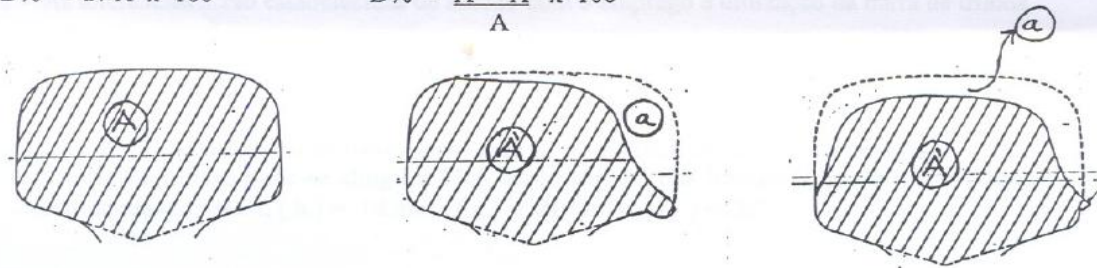


Fig. 2.10 - medição da área desgastada ou amassada

Fonte: PROSPECÇÃO 1998 – COMISSÃO DE TRILHOS MRS

2.5.2 PERDA LINEAR NO CANTO DE BITOLA E NA ALTURA DO BOLETO

Para se obter a perda linear no canto de bitola, Fig. 2.11, existe a medida (h) que é igual a (c) medida em milímetros no centro do boleto, (g) medida em milímetros na linha de bitola e (f) também em milímetros medida na diagonal do canto de bitola.

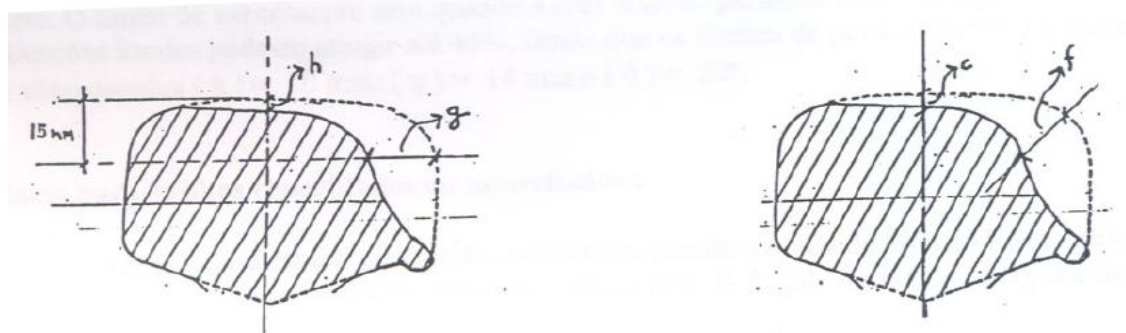


Fig. 2.11 - Perda linear amassada

Fonte: PROSPECÇÃO 1998 – COMISSÃO DE TRILHOS MRS

2.5.3 ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DESGASTADA

É a inclinação medida em graus, Fig. 2.12, que representa o desgaste do trilho.

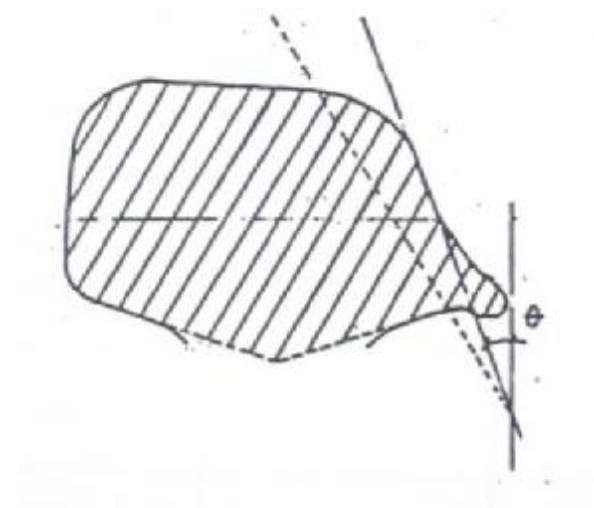


Fig. 2.12 - Ângulo de inclinação amassada

(Fonte: PROSPECÇÃO 1998 – COMISSÃO DE TRILHOS MRS)

2.6 TOLERÂNCIAS

As tolerâncias para trilhos variam de acordo com a utilização das linhas e o grau de segurança exigido. Deve-se lembrar que a bitola não pode ser maior que 1635 mm em qualquer situação de desgaste para evitar descarrilamento por bitola aberta.

2.6.1 TRILHOS NÃO TRANSPOSTOS

A tolerância para trilhos não transpostos é de no máximo 30% de área desgastada, e em situações extremas pode chegar a 35% desde que um dos limites de perda linear e ângulo não sejam ultrapassados, ou seja $h < 18\text{mm}$, $g < 21\text{mm}$ e $\theta < 32^\circ$.

2.6.2 TRILHOS TRANSPOSTOS

A perda de área do boleto, somando a área das duas faces desgastadas não pode atingir 35% e em situações extremas pode atingir até 45% desde que os limites de perda lineares e angulares não sejam superiores a $h < 10\text{mm}$; $g = 14\text{mm}$ e $\theta < 32^\circ$.

2.6.3 TRILHOS REPERFILADOS OU ESMERILHADOS

Para trilhos reperfilados ou esmerilhados o limite de perda de área do boleto pode atingir 55% e o limite de perda linear no centro do boleto 24mm, com o ângulo da face de desgaste praticamente igual a zero.

3 CONTATO RODA-TRILHO

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

Qualquer imperfeição em um destes componentes vai afetar o outro diretamente e indiretamente todos os demais componentes da Infra e Super-estrutura da Via, além das peças dos veículos ferroviários, gerando um maior custo com manutenção da ferrovia, afetando a confiabilidade do sistema, e aumentando os riscos.

A tecnologia do contato metal-metal na ferrovia é adequada para o transporte de carga pesado, pois as suas propriedades resultam em uma deformação mínima dos elementos em contato, assim provocando uma perda mínima de energia. (WILLIAM - 2001).

Segundo Pinheiro, 19XX as vantagens do contato roda-trilho são devido ao baixo coeficiente de atrito e devido às propriedades do material que oferecem pouca resistência ao deslocamento como mostrado na Fig. 3.1. O esforço (T) para puxar uma carga de peso (P) quando em terra dura e seca é de $\frac{1}{4}$ de (P), em quanto para deslocar a mesma massa com o contato roda-trilho o esforço (T) é de $\frac{1}{400}$ de (P).

Trenó em terra dura e seca	$T=P/4$
Roda em terra dura e seca	$T=P/40$
Pneu no asfalto	$T=P/100$
Roda de aço e trilho	$T=P/400$

Fig. 3.1 - Vantagens do contato Roda-Trilho Fonte: Pinheiro – 19XX

Segundo William et. Al., 2001 a interface entre roda-trilho é a chave para os problemas do *Heavy haul*, que deve ter baixa fricção para permitir o seu movimento

com pouca resistência. No entanto deve haver fricção suficiente para que exista o esforço trator, de frenagem e de direcionamento do trem.

Em estudo feito por um comitê da *Association of American Railroads*, sobre o efeito de calo nas rodas, constatou-se que um aplainamento de 2½" na superfície da roda produz um coeficiente de impacto de ao menos 2, e esse valor dobra quando o aplainamento é de 4¼". (BRANCO e FERREIRA - 2000).

A geometria de contato roda-trilho tem o formato elíptico, e os esforços dentro desta não são homogêneos e podem ser expressos na forma de uma parábola como mostra a Fig. 3.2. Se o contato for entre a flange da roda e o canto de bitola do boleto resulta nos defeitos de *head-checking* e *shelling* neste local como mostrado na Fig. 3.3.

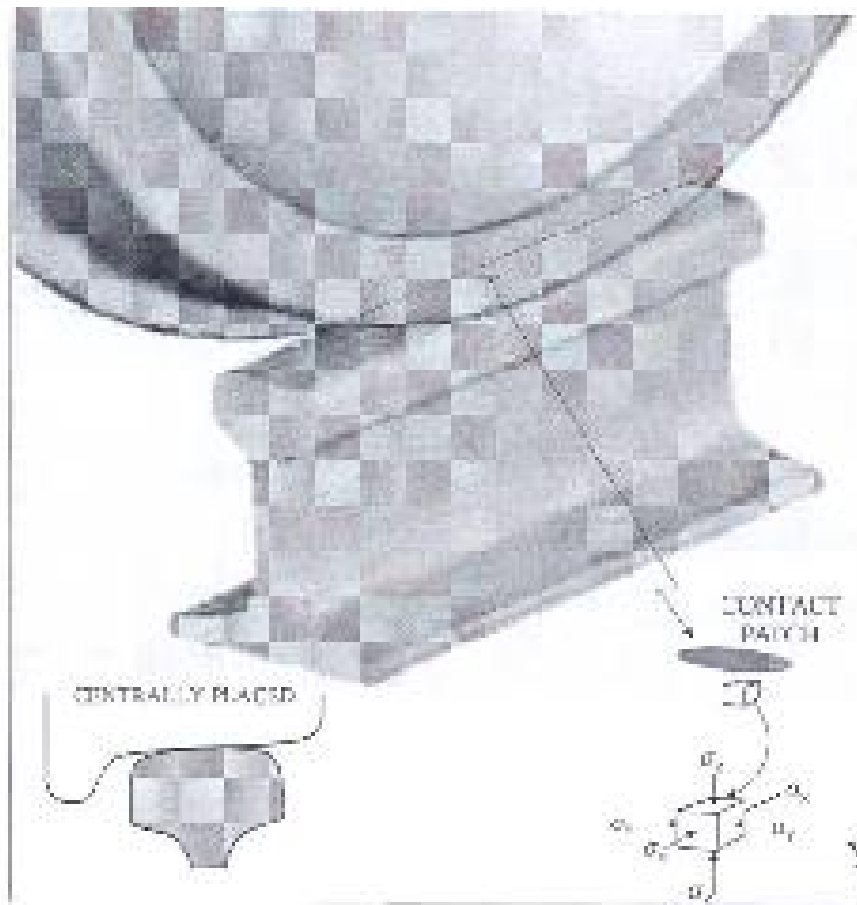


Fig 3.2 – Contato roda trilho Fonte : William - 2001

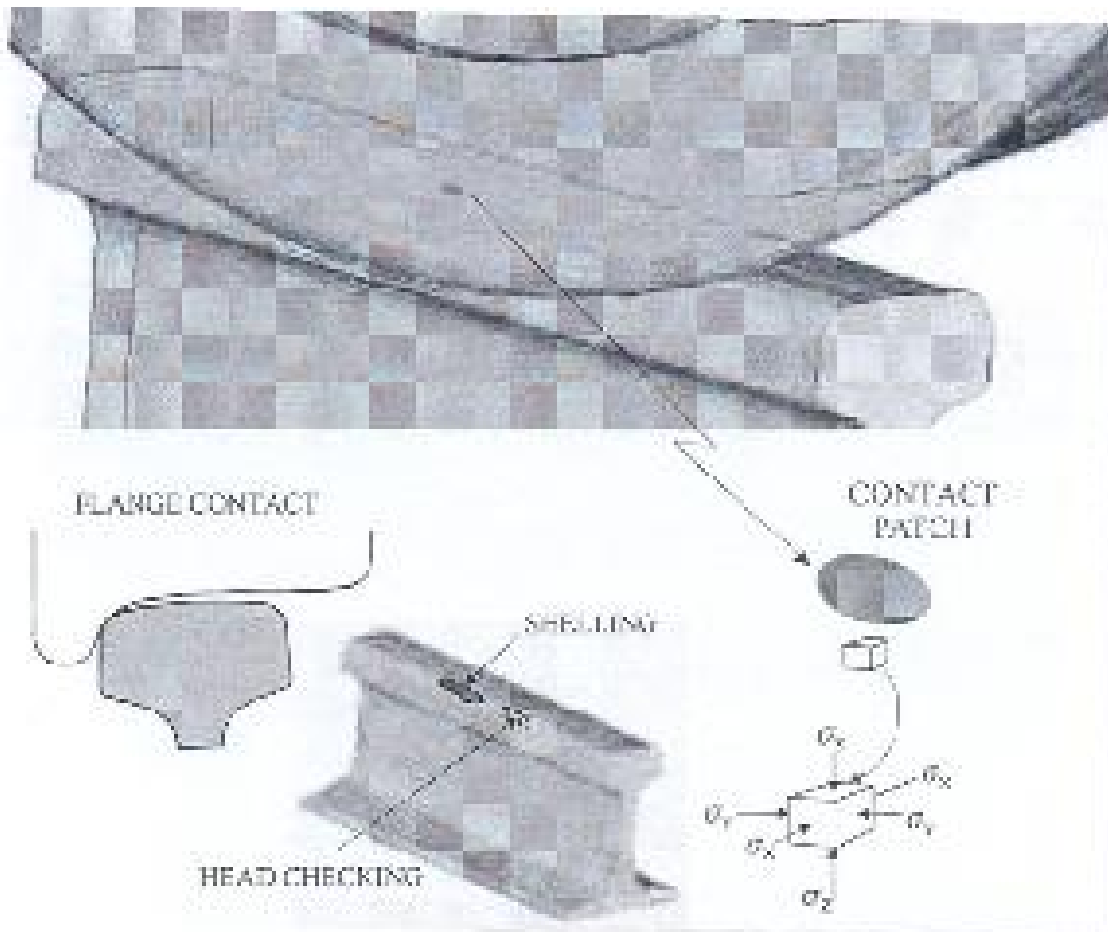


Fig. 3.3 - Contato flange trilho Fonte : William - 2001

A tensão máxima de cisalhamento do contato roda-trilho ocorre alguns milímetros abaixo da superfície de contato, e tem grande importância, pois acima de determinados valores pode levar à trincas superficiais que caracterizam o início da fadiga.

Através do modelo de Hertz é possível calcular a tensão de compressão máxima na superfície de contato imediatamente abaixo da roda, que é diferente da tensão máxima de cisalhamento. Quando são feitos os cálculos para a determinação da fadiga, deve-se levar em consideração as cargas permanentes e muito frequentes, enquanto cargas ocasionais podem ser desprezadas. As cargas são consideradas estáticas, pois as rodas não passam sempre na mesma trajetória no trilho.

Os defeitos de fadiga causados por tensões de cisalhamento críticas são:

- *Head checking*
- *Flaking*
- *Spalling*
- *Shelling*

O *head checking*, ou micro-trincas pode ser observado por sua aparência característica de microfissuras com inclinações de 10 a 30 graus com a superfície do trilho, do tamanho de fios de cabelo e separadas por espaços regulares de poucos milímetros. Aparece no boleto principalmente no canto de bitola na fila externa de trilhos em curvas de raio grande e vai se espalhando pelo boleto do trilho e quando isso ocorre a quebra de pequenos pedaços ou *Spalls*.

O *Flaking*, ou mini-escoriações, Fig. 3.4, é a evolução do *head checking* aonde as trincas vão se comunicando internamente causando leve perda de material, tendo aparência de mosaico ou de escama de cobra.



Figure 3.4 – *Flaking* Fonte: Marich – 2005

O *Spalling* ou escamações é caracterizado por substancial perda de material, porém superficial quando comparado com o *shelling*. As tensões de compressão

superiores ao limite de resistência do aço geram deformações permanentes, que assim como os defeitos de fadiga, sejam na roda ou no trilho, causam representativa perda de material na superfície de contato, o que submete a via e veículos a maiores vibrações e impactos.

O *shelling*, Fig. 3.5 e Fig. 3.6, é o mais severo destes defeitos pois se inicia em região mais profunda, geralmente em trilhos altos de curvas fechadas e costuma estar associado à presença de inclusões não metálicas de características críticas, não se formando regularmente ao longo do canto de bitola do trilho como o *head checking*.

Pode desenvolver *cracks* na horizontal ou vertical em ângulos de 10 a 30 graus que crescem na longitudinal até formar o *spall* ou forma defeitos transversais que se não for detectado a tempo pode levar a ruptura do trilho. (MARICH - 2005)



Fig. 3.5 - *Shelling* em estágio avançado Fonte: Marich 2005



Fig. 3.6 - Defeito transversal causado por *shelling*
Fonte: Marich 2005

Na via, os defeitos superficiais provocam vibrações que levam à deterioração do lastro e até rompimento de fixações. Os defeitos internos só são detectados através do ultra-som e têm início através de trincas internas que levam o trilho à ruptura.

Os defeitos internos podem ser:

- Trincamento interno do canto de bitola = *Detail Fracture* (DF)
- Trincas transversais no boleto = *Transverse fissure* (TF)
- Trinca horizontal do boleto = *Horizontal Split Head* (HSH)
- Trinca vertical do boleto = *Vertical Split Head* (VSH)

As deformações permanentes não levam o aço ao colapso, pois quanto maior a deformação, maior o limite de escoamento deixando as superfícies mais duras, como mostra a Fig. 3.7, gráfico tensão x deformação, o que acaba estabilizando a deformação. Além disso, a deformação plástica dos materiais depende não só da tensão máxima aplicada, o que causa a deformação lenta, mas também do tempo que ficou submetido, à carga e a temperatura que esta chegou.

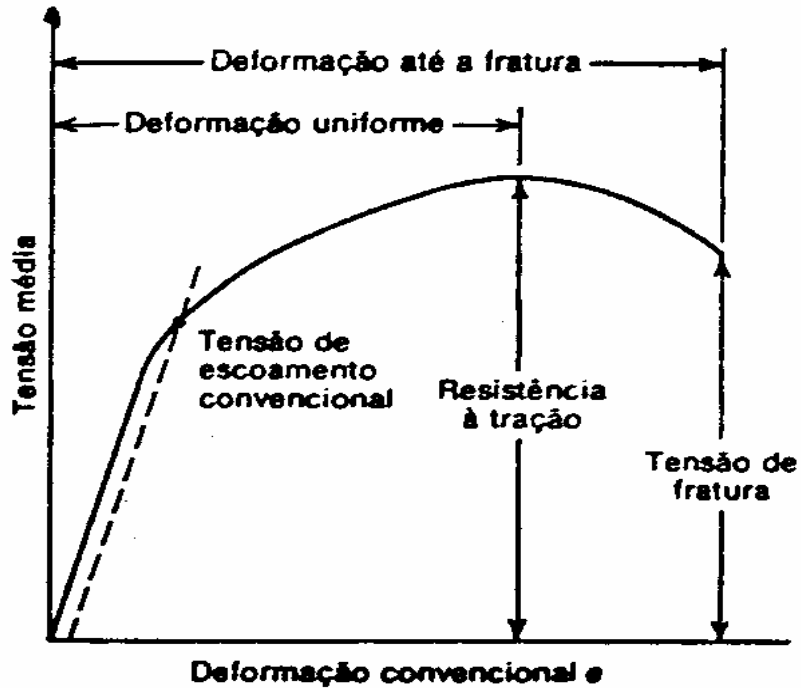


Figure 3.7 - Gráfico de Tensão x Deformação Fonte: Pinto 2005

Outro fator que evita o colapso do trilho é o trabalho a frio das rodas que forma tanto na roda como no trilho uma camada fina, dura e brilhante, constituída basicamente por martensita, o que aumenta a resistência do aço e seu limite de escoamento.

Existem algumas combinações de fatores que determinam se a vida do trilho vai ser em regime de desgaste ou fadiga.

Em regime de desgaste:

- raios de curva pequenos;
- base rígida longa e truques convencionais;
- inscrição inadequada dos truques;
- rodeiros desalinhados;
- contato roda-trilho mal lubrificado;
- amplo desgaste lateral para roda e trilho;

- ampla variação de bitola em curvas e retas;
- trilho de material mais macio;
- encaixe adequado entre roda e trilho com desgaste, quando o contato é feito no friso em curvas.

O desgaste dos trilhos ferroviários 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. (MARICH – 2005)



Fig. 3.8 - trilho com desgaste Fonte: Marich - 2005

A dureza dos trilhos é também outro fator que influencia diretamente no desgaste. Nos trilhos perlíticos, o desgaste diminui linearmente com o aumento da dureza, como pode ser observado na Fig. 3.9.

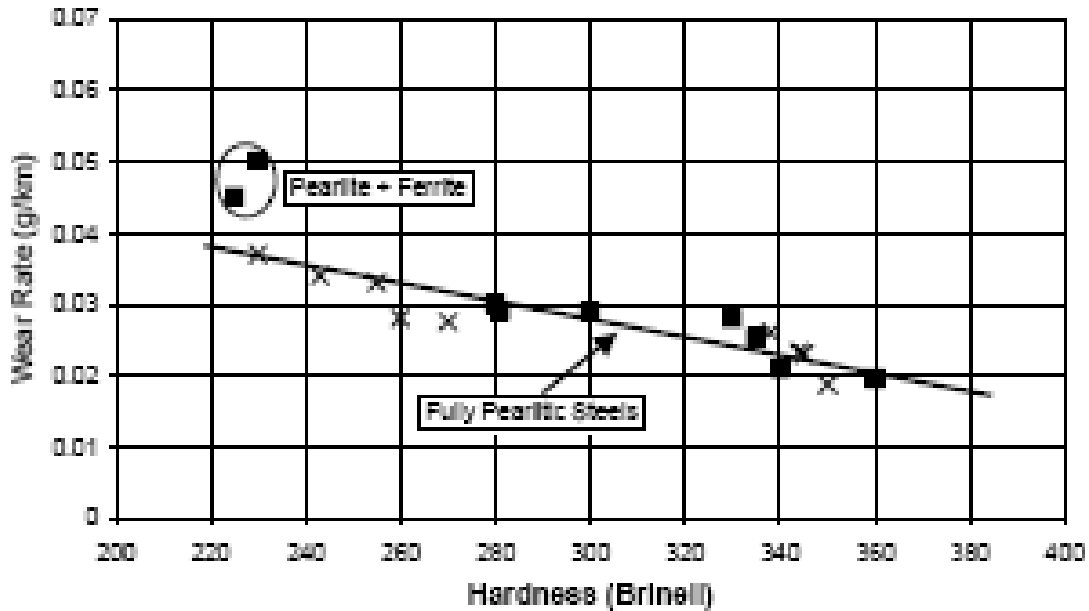


Fig. 3.9 - Gráfico dureza x desgaste Fonte: Marich - 2005

Para linhas que operam em regime de desgaste é possível estabelecer estratégias para melhorar o desempenho dos ativos, quais sejam.

a) Rodas novas com perfil suavemente côncavo

Deve-se buscar as principais tendências de desgaste para suavizar o contato roda-trilho desde o início.

b) Lubrificação

Uma boa lubrificação diminui o desgaste no contato roda-trilho

c) Reperfilamento

O reperfilamento dos trilhos é recomendável para promover um melhor aproveitamento do efeito côncavo das rodas.

d) Alinhamento de truques e rodeiros

Alinhamento de truques e rodeiros diminui o desgaste nas rodas e trilhos

e) determinação de limites econômicos de desgaste

Observando-se a brusca modificação na taxa de desgaste deve-se determinar os limites de desgaste. Em curvas o desgaste dos trilhos é mais acentuado principalmente devido ao maior contato da flange com o trilho externo e amassamento no trilho interno, como mostra a Fig. 3.10.

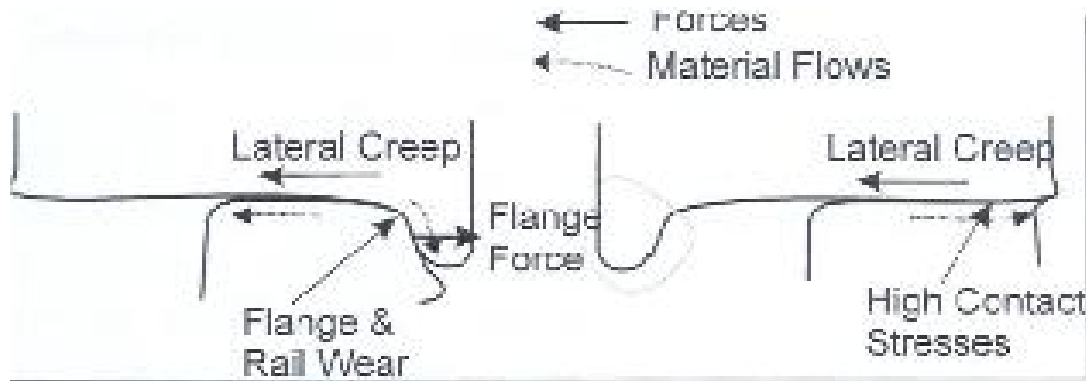


Fig. 3.10 - Desgaste de trilhos em curvas Fonte : William -2001

Em regime de fadiga, pode-se citar as seguintes estratégias para melhorar o desempenho dos ativos:

- linha basicamente reta;
- veículos de inscrição radial ou dirigíveis;
- inscrição adequada dos truques;
- tolerâncias rigorosas de bitola;
- trilhos de maior dureza.

E as ações para a melhor gestão de linhas em regime de fadiga são descritas abaixo.

a) Redução no limite de desgaste côncavo

Esta ação ameniza as tensões no contato roda-trilho.

b) Limitação da bitola em curvas

Diminuindo-se a bitola máxima permitida evita-se o contato do falso friso da roda no trilho interno das curvas.

c) Ampliação da bitola em retas

A bitola mais larga ajuda a distribuir melhor o apoio da roda, porém deve-se ter cautela, pois esta ação pode favorecer o movimento de *hunting* nos truques.

d) Roda com friso fino e conicidade suave

Quando o desgaste do friso não for significativo, um perfil de roda com perfil mais fino pode ser usado. Esta medida faz com que se tenha mais área para a roda fazer seu passeio pelo trilho.

e) Esmerilhamento

É recomendável o esmerilhamento dos trilhos quando os defeitos de fadiga começam a se instalar.

Quando a linha opera em regime de fadiga a roda tende a se apoiar apenas em uma região mais central, provocando desgaste concentrado, que forma uma concavidade na roda. Em curvas ou por algum movimento dinâmico do trem, a roda se apóia no trilho com o falso friso formado por essa concavidade, que provoca tensões bem maiores, pois o contato ocorre numa região menor, aumentando a pressão. Devido a esse contato, aparecem no trilho trincas de fadiga superficial e deformação plástica formando os defeitos *flaking* e *spalling*. (MAGALHÃES - 2000)

É possível também estimar através de fórmula se a vida útil do trilho será determinada por desgaste ou fadiga.

Se a relação $q_0/\sigma_e < 2$, sendo q_0 , tensão máxima de compressão no contato e σ_e , tensão de escoamento, é improvável a ocorrência de danos na superfície do trilho, assim a vida do trilho será determinada pelo desgaste.

Se a relação estiver no intervalo $2 \leq (q_0/\sigma_e) \leq 3$, são esperados defeitos de fadiga e se a ferrovia tiver tráfego intenso, os defeitos por fadiga serão predominantes.

Se a relação $q_0/\sigma_e > 3$, além dos problemas de fadiga, um estado de plasticidade tem lugar. (MAGALHÃES - 2000)

Em alguns países, o limite de segurança contra ocorrência de fadiga mecânica é dado pela relação (p/d) , onde p é a carga por eixo em toneladas e d o diâmetro da roda em pés. Quando esta relação é alta o *shelling* torna-se um fenômeno comum. Na MRS logística e outras ferrovias brasileiras de bitola larga em média o $p/d=10$ e o *shelling* e outros defeitos superficiais associados à fadiga são freqüentes.

3.1 CORRUGAÇÃO E DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Este tipo de deformação é dado a diversos fatores como:

- elevada carga com baixa velocidade;
- truques rígidos e mancais de rolamento;
- cargas leves com alta velocidade;
- desbalanceamento de rodas e eixos;
- vibrações na linha;
- vibrações no truque;
- faixas críticas de velocidades;
- deslizamento rotativo pela diferença de raios entre a fila interna e externa de raios.

A deformação plástica acontece quando a força de contato roda-trilho excede o limite de deformação plástica do aço. Na Fig. 3.11, pode-se observar o aspecto de um trilho que sofreu deformação plástica. Apesar da deformação plástica não iniciar defeitos que levem à quebra de trilhos ela pode causar diminuição da bitola, que aumenta o desgaste.



Figure 3.11 - Deformação plástica Fonte: Marich 2005

A corrugação pode aparecer de duas diferentes maneiras: Ondulações ásperas, bruscas e que causam elevados nível de ruído, afastadas de 30 a 90 mm, curtas duras e brilhantes e de pequena profundidade, Fig. 3.12, porém não oferecem sérios problemas e sua origem pode estar associada à via. As ondulações são mais longas, porém visualmente menos perceptíveis, com afastamento de cristas de 100 a 2000 mm e estão relacionadas ao equipamento. Os seus efeitos são: maior número de avarias no material rodante; aumento na resistência à tração; maior nível de ruído e custos operacionais ampliados.

Segundo Marich, 2005, o desenvolvimento das corrugações deve ser controlado pois aumenta a carga dinâmica provocada pelas rodas, aumentando assim a taxa de evolução de deteriorações e falhas em diversos componentes de via e veículos como:

- Defeitos de trilho (como *shelling*)
- Soldas
- Juntas de trilho
- Placa de apoio e dormentes
- Fixações elásticas (tendem a perder pressão)

- Lastro (que tende a criar pó e se arredondar)
- Geometria da via (principalmente devido a vibração e deterioração do lastro)
- Rodas e rolamento
- Pontes (principalmente quando a linha não tem lastro)

A corrugação não pode se instalar se a superfície do trilho é suficientemente dura para resistir ao escoamento plástico na passagem das rodas.



Fig. 3.12 – Corrugação Fonte: Marich Heavy haul

3.2 DIFERENÇA DE RAIOS NO CONTATO

A diferença de raio no contato roda-trilho tem um papel importante no comportamento dos veículos ferroviários quando em *hunting* (movimento de passeio da roda sobre a superfície de rolamento do trilho) e curvas, o que influencia a vida útil dos trilhos.(KALOUSEK - 2001).

A roda ferroviária tem um formato cônico o que provoca, quando existe um deslocamento do centro do eixo do rodéiro em relação ao eixo da via, a descrição de um raio menor que o do outro lado, como mostra a Fig. 3.13.

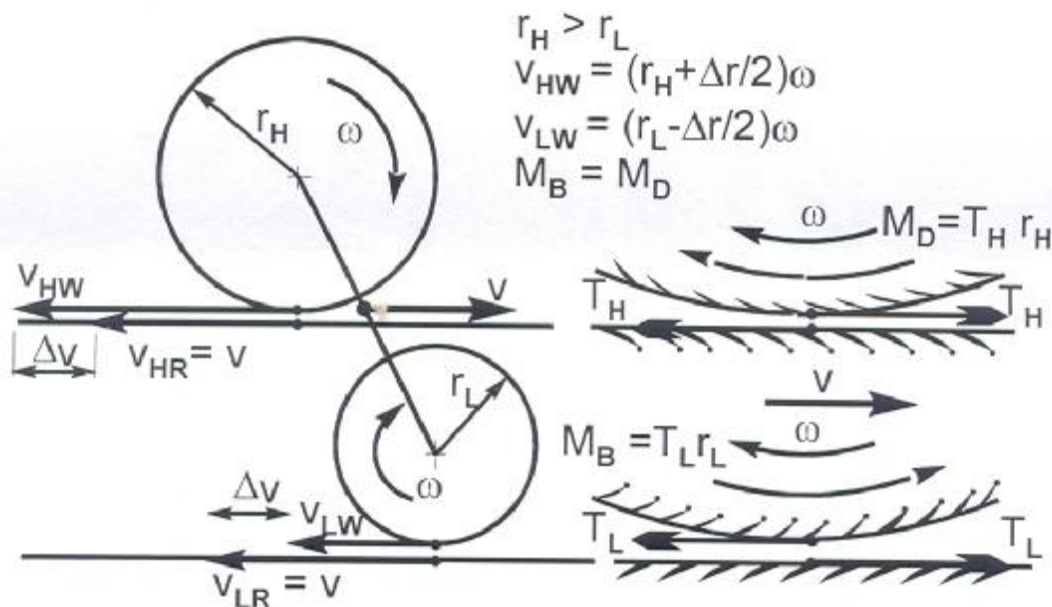


Fig. 3.13 - Diferença no raio Fonte: KALOUSEK - 2001

Na figura 3.13 podemos observar o esquema de um rodéiro em que as rodas estão girando com raios diferentes. A roda que gira com um raio maior percorre um espaço no trilho mais longo, no entanto, como o eixo é rígido e perpendicular ao trilho, isso cria uma força que arrasta a roda com raio menor, aumentando o desgaste do trilho.

4 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Existem diversos tipos de ferrovias usadas para diversos propósitos, o que vai influenciar no tipo de trilho que deve ser aplicado na via permanente. Uma ferrovia de transporte de passageiros tem características distintas de uma ferrovia de *heavy haul*, que solicita mais toda a infra e super estrutura da via, isso ocorre devido à diferença de peso das composições, sua velocidade e sua freqüência.

A MRS logística é uma ferrovia que transportou em 2005, 108.000.000 de toneladas sendo a carga principalmente minério, utilizando um trem tipo atual com tração de 3 a 5 locomotivas e 132 vagões pesando carregados de 100 a 125 toneladas cada, o que significa que cada eixo transfere, através das rodas, 32 toneladas aos trilhos.

Em estudos feitos por especialistas da área de engenharia, foi constatado que os trechos mais críticos da malha são:

Ferrovia do Aço, construída em 1989 pelo governo é a seção mais moderna da MRS, é um trecho crítico pelo grande volume transportado que dificulta o CCO (Centro de Controle Operacional) a ceder intervalos para a manutenção da malha, a alta velocidade das composições e pela existência de muitos túneis e pontes.

Serra do Mar, parte da antiga linha Central é crítica devido à existência de curvas de raios pequenos, raios de até 170 m e alta inclinação, gradiente chega à 2,3%, o que causa um desgaste rápido dos trilhos.

Para a comparação de diferentes trilhos e avaliar qual é o mais apropriado para o uso em uma determinada linha existe uma metodologia de cálculo conhecida com LCC (*Life Cycle Cost*) onde são considerados os seguintes fatores: Tempo de vida até fadiga, Tempo de vida até desgaste, e Custo de esmerilhamento.

Usando dados da MRS logística será demonstrado o cálculo através do método LCC comparando dois trilhos de alto desempenho de diferentes fabricantes. Os trilhos avaliados são: um do fabricante francês Corus, modelo MHH-Micro alloyed Fully Head e o outro da Nippon Steel, modelo HE-400. Suas composições químicas estão na Fig. 4.1.

MHH-Micro alloyed Fully Head					
C %	Mn %	P %	S%	Si%	Cr%
0,72	0,80			0,40	0,40
0,82	1,10	£ 0,025	£ 0,025	0,80	0,60

HE- 400 Hypereutectoid Steel Rails					
C %	Mn %	P %	S%	Si%	Cr%
0,89	0,61	£ 0,014	£ 0,009	0,48	0,21
0,90	1,01			0,50	0,25

Fig. 4.1 – Composição química dos trilhos comparados Fonte Ch. Vidon - 2005

Verifica-se na Fig. 4.1 que a porcentagem de cromo do trilho MHH é bem maior que a do HE-400, o cromo prejudica a soldabilidade dos trilhos o que é um ponto negativo do trilho MHH. Os seus índices físicos e mecânicos são demonstrados na Fig. 4.2.

MHH -Trilho Micro Ligado com Boletto Endurecido				
Dureza BHN	Tensão de Escoamento	Tensão de Ruptura	Alongamento (%)	Tensão Residual na Alma
363 - 401	830 MPa	1280 MPa	≥ 12	Terá de ser Estimada

HE- 400 Trilho Hipereutectoide				
Dureza BHN	Tensão de Escoamento	Tensão de Ruptura	Alongamento (%)	Tensão Residual na Alma
370 - 415	980 MPa	1435 MPa	≥ 13,5	(0) or (-)

Fig. 4.2 – Índices físicos e mecânicos Fonte Ch. Vidon - 2005

Os trechos da malha escolhidos para este estudo foram a Ferrovia do Aço e a Serra do Mar e para saber a quantidade de carga que passam nestas linhas foi usada uma tabela em Excel que faz a estimativa em TU (tonelada útil) da quantidade de carga dividida em setores da MRS, considerando um cenário agressivo de transporte. A Fig. 4.3 mostra um esquema da malha da MRS logística, contendo ao lado de cada trecho a quantidade de TU prevista para o ano em determinado e cenário escolhido.

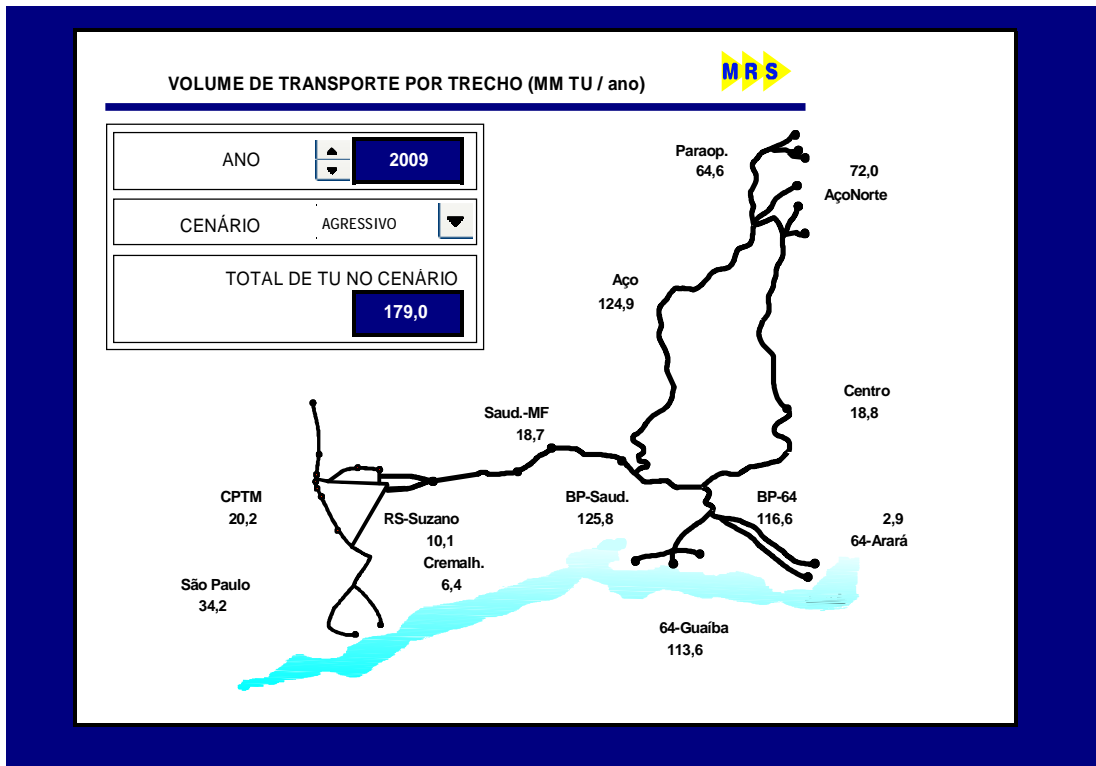


Fig. 4.3 - Planilha usada para estimar a quantidade de TU por trechos Fonte: MRS

As informações referentes ao limite de fadiga e de desgaste dos trilhos são fornecidas pelos fabricantes através de curvas que levam em consideração o perfil da linha.

4.1 LIMITES DE DESGASTE E FADIGA NA FERROVIA DO AÇO

Para a Ferrovia do Aço os limites de fadiga e desgaste não são muito distintos, devido ao grande raio das curvas e declividade não muito alta, estes números são obtidos pela engenharia da MRS logística através de informações fornecidas pelos fabricantes, perfil da linha e trafego.

Para o trilho MHH, (*Micro alloyed fully Head Hardened (eutectoid) Steel Rail made by Corus Rail Hayange, France*) fabricado na França pela Corus os limites de desgaste e fadiga serão:

- Limite de Desgaste: 1.500 MGT
- Limite de Fadiga: 2.350 MGT

Para o trilho HE- 400 (*HiperEutectoid Steel Rail made by Nippon Steel Yawata Works, Japan*) fabricado no Japão pela Nippon Steel os limites de desgaste e fadiga serão:

- Limite de Desgaste: 2.070 MGT
- Limite de Fadiga: 3.689,5 MGT

O **limite de desgaste** do trilho MHH é aproximadamente **27 %** inferior em relação ao HE-400 e o **limite de fadiga** é aproximadamente **36 %** inferior. Na Ferrovia do Aço, para se verificar a durabilidade em anos de cada trilho foi usada a Fig. 4.4, que mostra por ano a tonelada bruta acumulada prevista.

Ano	TU Anual	TB Anual	TB Acum.	
2006	85,5	123,975		
2007	105,8	153,41	277,4	
2008	118	171,1	448,5	
2009	125	181,25	629,7	
2010	125	181,25	811,0	
2011	125	181,25	992,2	
2012	125	181,25	1.173,5	
2013	125	181,25	1.354,7	
2014	125	181,25	1.536,0	- Limite de Desgaste MHH
2015	125	181,25	1.717,2	
2016	125	181,25	1.898,5	
2017	125	181,25	2.079,7	- Limite de Desgaste HE - 400
2018	125	181,25	2.261,0	
2019	125	181,25	2.442,2	- Limite de Fadiga MHH
2020	125	181,25	2.623,5	
2021	125	181,25	2.804,7	
2022	125	181,25	2.986,0	
2023	125	181,25	3.167,2	
2024	125	181,25	3.348,5	
2025	125	181,25	3.529,7	- Limite de Fadiga HE- 400

Fig. 4.4 - Tempo de duração dos trilhos na Ferrovia do Aço

Pode-se verificar que, para o trilho MHH, a duração até o limite de desgaste foi até 2014 enquanto para o trilho HE-400 foram 3 anos a mais. Quanto ao limite por fadiga o MHH resiste até 2019 enquanto o HE-400 até 2025.

4.2 LIMITES DE DESGASTE E FADIGA NA SERRA DO MAR

Para o trilho MHH, (*Micro alloyed fully Head Hardened (eutectoid) Steel Rail made by Corus Rail Hayange, France*) fabricado na França pela Corus os limites de desgaste e fadiga serão:

- Limite de Desgaste: 400 MGT
- Limite de Fadiga: 2.350 MGT

Para o trilho HE- 400 (*HiperEutectoid Steel Rail made by Nippon Steel Yawata Works, Japan*) fabricado no Japão pela Nippon Steel os limites de desgaste e fadiga serão:

- Limite de Desgaste: 552 MGT
- Limite de Fadiga: 3.689,5 MGT

O **limite de desgaste** do trilho MHH é aproximadamente **29 %** menor em relação ao HE-400 e o **limite de fadiga** é aproximadamente **36 %** menor.

Nota-se que o Limite de Fadiga não modifica na Ferrovia do Aço e Serra do Mar, já o Limite de Desgaste muda significativamente, no entanto a diferença em porcentagem dos dois continua próxima. Na Serra do Mar, para se verificar a durabilidade em anos de cada trilho foi usada a Fig. 4.5, que mostra por ano qual será a tonelada bruta acumulada.

Ano	TU Anual	TB Anual	TB Acum.	
2006	76,3	110,6		
2007	96,5	139,9	250,6	
2008	109,1	158,195	408,8	- Limite de Desgaste MHH
2009	116,6	169,07	577,8	- Limite de Desgaste HE - 400
2010	117,6	170,5	748,3	
2011	118,6	172,0	920,3	
2012	119,6	173,4	1.093,7	
2013	120,6	174,9	1.268,6	
2014	121,6	176,3	1.444,9	
2015	122,6	177,8	1.622,7	
2016	123,6	179,2	1.801,9	
2017	124,6	180,7	1.982,6	
2018	124,6	180,7	2.163,3	
2019	124,6	180,67	2.343,9	- Limite de Fadiga MHH
2020	124,6	180,7	2.524,6	
2021	124,6	180,7	2.705,3	
2022	124,6	180,7	2.885,9	
2023	124,6	180,7	3.066,6	
2024	124,6	180,7	3.247,3	
2025	124,6	180,7	3.427,9	
2026	124,6	180,67	3.608,6	- Limite de Fadiga HE- 400

Fig. 4.5 - Tabela de Tempo de duração dos trilhos na Serra do Mar

4.3 ESMERILHAMENTO

Na MRS logística existe uma política de esmerilhamento que visa estender a vida útil dos trilhos em no mínimo 2,5 vezes. A área de Engenharia é quem define os ciclos de esmerilhamentos de acordo com as condições do tráfego da linha e as características de resistência mecânica do trilho, principalmente a resistência à fadiga.

Os ciclos de esmerilhamentos calculados para os trilhos MHH e HE-400 são diferentes devido às suas características metalúrgicas, assim como são diferentes também para a Ferrovia do Aço e Serra do Mar devido ao perfil de via.

4.3.1 QUANTIDADE DE CICLOS

A quantidade de ciclos de esmerilhamento necessária é conhecida pela divisão da quantidade de TB (tonelada bruta) prevista para passar na via, pela necessidade de esmerilhamento do trilho, que é dado pelos parâmetros da via e qualidade do trilho empregado. Na Ferrovia do Aço com o trilho MHH é previsto uma necessidade de esmerilhamento a cada 30 MTB (milhões de toneladas brutas), o que vai totalizar 51 ciclos no regime de desgaste e 81 no regime de fadiga. Já com o trilho HE-400 o esmerilhamento é esperado a cada 60 MGT, o que vai totalizar 35 ciclos no regime de desgaste e 59 no regime de fadiga.

Na Serra do Mar o número de ciclos para o regime de desgaste será bem inferior ao da Ferrovia do Aço pois sua vida útil nesta situação é menor devido aos raios de curvas pequenos e alta inclinação. Com o trilho MHH o esmerilhamento previsto é a cada 20 MGT totalizando 20 Ciclos no regime de desgaste e 117 no regime de fadiga. Se usado o trilho HE-400 será executado o esmerilhamento a cada 40 MGT o totalizando 14 Ciclos no regime de desgaste e 90 no regime de fadiga

4.3.2 CUSTO DO CICLO DE ESMERILHAMENTO

Para estimar quanto será gasto em esmerilhamento em cada trilho e linha será admitido um custo em dolares de \$ 5,90 por Ciclo.

Na Fig. 4.6 observa-se os custos de esmerilhamento em dólares de acordo com o trecho, tipo de trilho e critério de troca.

		Ferrovia do Aço	Serra do Mar
MHH	Desgaste	300,9	118
	Fadiga	477,9	690,3
HE-400	Desgaste	206,5	82,6
	Fadiga	348,1	531

Fig. 4.6 - Tabela de custo de esmerilhamento

Esta tabela é usada como referência para somar o custo de esmerilhamento ao preço do trilho.

4.4 LCC (LIFE CICLE COST) CUSTO DO CICLO DE VIDA

O LCC é um valor em uma determinada moeda que representa o custo anual de um determinado trilho.

Para finalizar a análise LCC deve-se obter o custo dos trilhos já no preço mínimo oferecido pelos fabricantes.

Neste trabalho será feita apenas a comparação de quanto o preço de um fabricante deve ser mais barato que o outro em porcentagem usando um valor em dólares aproximado para o trilho HE-400 já que os preços de trilhos variam muito de acordo com o mercado, com a época do ano e com as constantes variações dos preços de seus componentes. Assim pretende-se chegar ao valor aproximado de desconto que o trilho com desempenho inferior deve oferecer para que se torne economicamente competitivo.

O preço adotado para o trilho HE-400 nesta comparação será em dólares de \$ 1000,00, valor que está próximo ao valor real do trilho em determinada época do ano e condição de mercado.

O cálculo do LCC é feito através da comparação do resultado da soma do custo de esmerilhamento ao custo do trilho e dividido pela sua vida estimada. O trilho que obter o menor LCC tem o menor custo no seu ciclo de vida e, portanto é o mais apropriado para a aplicação.

4.4.1 LCC FERROVIA DO AÇO

O trilho que apresentou o melhor desempenho na Ferrovia de Aço foi o HE-400, pois teve uma duração maior tanto em desgaste (12 anos) quanto em fadiga (20 anos), portanto o fabricante que deve oferecer desconto para que os trilhos fiquem competitivos economicamente é o do MHH.

4.4.1.1 CÁLCULO PARA SITUAÇÃO DE DESGASTE

O calculo do custo do ciclo de vida para a situação de e encontrado pela soma do preço do trilho mais seu custo de esmerilhamento e dividindo-os pelo número de anos: LCC desgaste p/ HE-400 = (1000 + 206,5) / 12

O resultado desta conta do LCC de desgaste do HE-400 na Ferrovia do Aço é \$ 100,54. Este Valor deve ser igualado matematicamente ao LCC de desgaste do MHH para que possamos chegar ao valor do trilho MHH para que seja economicamente competitivo.

Cálculos:

$$\text{LCC desgaste p/MHH} = ((\text{Valor MHH}) + 300,9) / 9$$

$$((\text{Valor MHH}) + 300,9) / 9 = 100,54$$

$$\text{Valor MHH} = \$ 603,97$$

Portanto na condição de Desgaste na Ferrovia do Aço o trilho MHH deveria ter seu valor aproximadamente 40% inferior ao do HE-400

4.4.1.2 CALCULO PARA SITUAÇÃO DE FADIGA

O calculo do custo do ciclo de vida para a situação de e encontrado pela soma do preço do trilho mais seu custo de esmerilhamento e dividindo-os pelo número de anos: LCC fadiga p/ HE-400 = (1000 + 348,1) / 20

O resultado do calculo acima é \$ 67,40, valor que será igualado ao LCC de fadiga para o trilho MHH.

Cálculos:

$$\text{LCC fadiga p/MHH} = ((\text{Valor MHH}) + 477,9) / 14$$

$$((\text{Valor MHH}) + 477,9) / 14 = 67,40$$

$$\text{Valor MHH} = \$ 465,7$$

Portanto na condição de Fadiga na Ferrovia do Aço o trilho MHH deveria ter seu valor aproximadamente 53% inferior ao do HE-400.

4.4.2 LCC SERRA DO MAR

Também na Serra do Mar o HE-400 tem uma expectativa de vida maior que a do MHH seja no critério de Desgaste (4 anos) ou Fadiga (21 anos), portanto o trilho que deverá oferecer desconto deve ser o MHH.

4.4.2.1 CÁLCULO PARA SITUAÇÃO DE DESGASTE

O calculo do custo do ciclo de vida para a situação de e encontrado pela soma do preço do trilho mais seu custo de esmerilhamento e dividindo-os pelo número de anos: $\text{LCC desgaste p/ HE-400} = (1000 + 82,6) / 4$

O resultado desta conta do LCC de desgaste do HE-400 na Serra do Mar é \$ 270,65. Este Valor deve ser igualado matematicamente ao LCC de desgaste do MHH para que possamos chegar ao valor do trilho MHH para que seja economicamente competitivo.

Cálculos:

$$\text{LCC desgaste p/MHH} = ((\text{Valor MHH}) + 118) / 3$$

$$((\text{Valor MHH}) + 118) / 3 = 270,65$$

$$\text{Valor MHH} = \$ 693,95$$

Portanto na condição de Desgaste na Serra do Mar o trilho MHH deveria ter seu valor aproximadamente 31% inferior ao do HE-400

4.4.2.2 CALCULO PARA SITUAÇÃO DE FADIGA

O calculo do custo do ciclo de vida para a situação de e encontrado pela soma do preço do trilho mais seu custo de esmerilhamento e dividindo-os pelo número de anos: $LCC \text{ fadiga p/ HE-400} = (1000 + 531) / 21$

O resultado do calculo acima é \$ 72,90, valor que será igualado ao LCC de fadiga para o trilho MHH.

Cálculos:

$$LCC \text{ fadiga p/MHH} = ((\text{Valor MHH}) + 690,3) / 14$$

$$((\text{Valor MHH}) + 690,3) / 14 = 72,90$$

$$\text{Valor MHH} = \$ 330,3$$

Portanto na condição de Fadiga na Ferrovia do Aço o trilho MHH deveria ter seu valor aproximadamente 67% inferior ao do HE-400.

5 CONCLUSÃO

As modernas ferrovias de Heavy haul estão sujeitas a tráfego intenso com trens velozes e grande cargas por eixo. Existem vários critérios para determinar o aço adequado para as aplicações ferroviárias. O primeiro é a integridade estrutural, que pode ser comprometida por inúmeras variedades de mecanismos de fadiga, por falta de resistência, fratura frágil, deformações plásticas e desgaste excessivos. Tudo isso depende de parâmetros de engenharia, propriedades do material e do ambiente de aplicação. Os trilhos devem ser fabricados com alto padrão de qualidade, afim de evitar defeitos internos, aumentar a vida do material e diminuir os custos. (Bhadeshia 2002)

Embora os fabricantes de trilhos tenham feito uma grande evolução em controle das propriedades e qualidade do aço a maioria dos trilhos modernos tem microestruturas perlíticas e química carbono-magnésio semelhante aos trilhos produzidos em 1900. É notável que as melhorias que aconteceram durante a vida do trilho não foram atingidas alterando a química básica ou a microestrutura dos trilhos. (KRISTAN e SAWLEY – 2003)

Para a aquisição de novos trilhos ferroviários é necessário conhecer todas as suas propriedades químicas e mecânicas, assim como as características dos trechos da ferrovia onde serão instalados e finalmente o tipo de material rodante que vai interagir com a via. Tendo em mãos as devidas informações, deve ser feita a análise econômica a fim de comparar a performance estimada do trilho com o seu preço proposto pelo fabricante. O trilho mais apropriado para uma ferrovia não está diretamente relacionado ao trilho com melhor performance e sim a relação entre seu custo e seu desempenho. O contato roda-trilho está associado à vida útil do trilho e o modo como os dois irão interagir vai determinar se esta será por critério de desgaste ou fadiga. Tal identificação deve ser feita em função de características da via e irão balizar também a manutenção do trilho no trecho.

Na MRS logística, vem sendo priorizado o uso de trilhos de última geração nas linhas mais críticas a fim de diminuir o tempo necessário de interferência das equipes de manutenção de via, postergar a necessidade de troca das barras, adiando investimentos, e aumentando a segurança e previsibilidade do transporte ferroviário e satisfação do cliente.



STEEL RAIL SPECIFICATIONS AT MRS NETWORK

STEEL RAIL CHEMICAL COMPOSITION

ITEM #	FUNCTION	CONVENTIONAL TYPE	CHEMICAL COMPOSITION (max %)											Carbon Content				
			C	Mn	P	S	Phos	Si	Al	N	As	Bi	Mo	Nb	Th			
#1	CPM 9142L 917	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#2	CPM 9142L 914	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#3	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#4	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#5	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#6	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#7	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#8	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#9	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#10	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#11	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#12	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#13	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#14	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#15	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#16	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#17	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#18	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#19	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
#20	Rockwell CPM 9142L 913	ASTM A912	0.08	0.03	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005

RAIL MECHANICAL PROPERTIES

	TYPE OF RAIL	CATEGORY	CONVENTIONAL TYPE OF RAIL	PLASMA TUNGSTEN BORON TBT	DEFLECTION (mm)	HARDNESS	TENSILE STRENGTH (N)	TORSILE STRENGTH (N)	YR /TS	ELONGATION
Block 1067	ARESA / SRA3 Rail Specification		ARESA 1083	Fixed Load in ton						% min
# 1	CORRIBAR 1972	ARESA 108 RE	ARESA Standard Carbon Rail	165	38	270	550	890	69%	8 min
# 2	CON - CON BRABL 1974	ARESA 108 RE	CON C 101 - 810y	198	25	290 - 320	610	1000	69%	8 min
# 3	NIPPON CON - BRABL 1978	ARESA 108 RE	CON 40-41y	198	25	290 - 320	650	1000	67%	8
# 4	NIPPON SHU 1975	ARESA 108 RE	Head Hardened - NCC	204	19 - 25	321 - 375	600	1100	75%	14
# 5	NIPPON SHU 1978	ARESA 108 RE	Head Hardened Improved - NCC	223	19	341 - 388	620	1200	67%	14
# 6	NIPPON KOKAI 1980	ARESA 108 RE	Low Head Hardened - NCC	208	19 - 25	321 - 375	790	1120	69%	14
# 7	HSA - KAWADA-IT 1987	ARESA 108 RE	HAIR - 51JF Head Treat	223	19 - 25	321 - 388	820	1200	67%	8 min
1007 to 2004	ARESA Basic Specification	ARESA 108 RE	ARESA 1084 Standard Carbon Rail	179	38	288	483	945	60%	9 min
# 8	ARESA - Specification 1984	ARESA 108 RE	ARESA 1084 Head Hardened Rail	218	19	369 - 390	750	1175	64%	10 min
# 9	HY - HAYANOE - SHI 1987	ARESA 108 RE	HY - Standard Head Hardened	217	19	341 - 388	750	1172	65%	10 min
# 9	DO - HSH VOEST ALPINE 1988	ARESA 108 RE	DO - Head Special Hardened 350 LMT	225	19	390 min	820	1200	67%	11
# 10	DO - SC VOEST ALPINE 1988	ARESA 115 RE	ARESA 1084 Standard Carbon Rail	179	38	288	483	945	60%	9 min
# 11	NIPPON SHU 1989	ARESA 108 RE	NCC - C101 370	248	19	369 - 388	810	1220	67%	15
# 12	NIPPON SHU 1989	ARESA 108 RE	NCC - C101 340	227	19 - 25	319 - 366	820	1200	67%	15
# 13	NIPPON SHU 1989	ARESA 108 RE	NCC - 7H 370M	242	19	341 - 388	850	1303	69%	14
# 14	NIPPON SHU 1989	ARESA 108 RE	NCC - 7H 340	225	19 - 25	321 - 375	807	1203	67%	14
# 15	UK - Sneyly Steel 2001	ARESA 108 RE	Improved High Purity	213	19	341 - 388	820	1180	69%	9
# 16	ACERAMIA - Mironovs-2002	ARESA 108 RE	ML 108 RE EN15258A	195	25	320 - 340	618	980	62%	9
# 17	HAYANOE - SHI 2005	ARESA 108 RE	HY - SHI SHIMADA Head Hardened	223	19	368 min	820	1200	67%	11
2005	ARESA Basic Specification Review of ARESA - Specification 2004	ARESA 108 RE	Standard Strength Rail (65 LA)	185	25	300	618	967	62%	10 min
			Intermediate Strength Rail (91)	191	25	325	650	1029	64%	8 min
			High Strength Rail (94 LA)	222	19	370	840	1197	70%	10 min
# 18	HY - HAYANOE - SHI 2005	ARESA 108 RE	HY - SHI 810y Very Head Hardened	227	19	370-401	880	1280	70%	12 min
# 19	NCC - NIPPON SHU Corporation 2005	ARESA 108 RE	NCC - HE (10mm top of Steel Rail)	266	19	370 - 415	920	1426	69%	13.5 min
# 20	JFE Steel Corporation (maxX) 2005	ARESA 108 RE	JFE - SH (Super Hard Rail Steel Rail)	248	19	380 - 415	910	1338	69%	13.5 min