

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Desgastes em trilhos ferroviários – Um estudo teórico

Paula da Silva Semprebone

Campinas

2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Desgastes em trilhos ferroviários – Um estudo teórico

Paula da Silva Semprebone

Orientador: Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Transportes.

Campinas, SP
2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Se54d	<p>Semprebone, Paula da Silva</p> <p>Desgaste em trilhos ferroviários – um estudo teórico / Paula da Silva Semprebone.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.</p> <p>Orientador: Cassio Eduardo Lima de Paiva. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.</p> <p>1. Ferrovias. 2. Ferrovias - Trilhos. 3. Ferrovias – Trilhos - Defeitos. I. Paiva, Cássio Eduardo Lima de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.</p>
-------	--

Titulo em Inglês: Wear in railway tracks – a theoretical study

Palavras-chave em Inglês: Railway, Permanent track, Track, Rail wear, Defaults

Área de concentração: Transportes

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Carlos Alberto Bandeira Guimarães e Luiz Francisco Muniz da Silva

Data da defesa: 07/12/2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

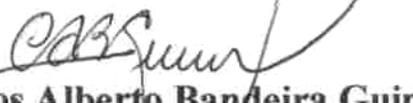
Desgastes em trilhos ferroviários – Um estudo teórico

Paula da Silva Semprebone

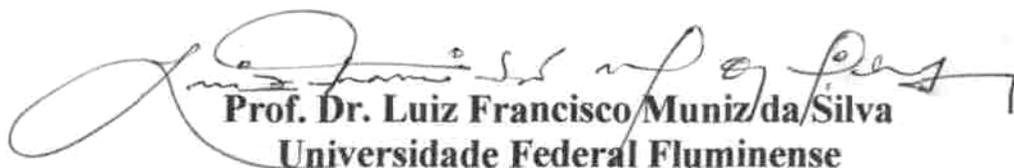
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva
Presidente e Orientador/ Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Carlos Alberto Bandeira Guimarães
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Luiz Francisco Muniz da Silva
Universidade Federal Fluminense

Campinas, 07 de dezembro de 2005

Dedicatória

Com todo amor a Miguel e Roseana pelo apoio irrestrito e encorajamento, a Cristiane e Angela pelo incentivo.

Agradecimentos

A autora deseja expressar seus agradecimentos ao amigo e Professor Cassio Eduardo Lima de Paiva, orientador desta dissertação, pela experiência e responsabilidade empenhadas no direcionamento deste trabalho.

Manifesta gratidão, também, à Companhia Paulista de Trens Metropolitanos, sobretudo aos Engenheiros João Renato Pepe e Gleyson Marzola, que permitiram a viabilização desta jornada e, aos quais espera retribuir com o conteúdo deste trabalho.

Agradece ainda à MRS Logística S.A., na pessoa do especialista Alexandre S. Leonardo, pela realização das medidas de campo, e de Fernando C. M. Silva, pelo fornecimento de dados e pela atenção concedida.

Estende os agradecimentos à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, berço de sua formação acadêmica, a qual dá continuidade, com muito orgulho, com o desenvolvimento desta pós graduação e aos professores deste curso, pelo conhecimento transmitido, além dos colegas, pela companhia agradável neste período, especialmente a Carolina Berti e Marcus dos Reis pela amizade e incentivo.

É ainda grata a seus pais, por ensinarem os princípios e valores da vida e por enxergarem no “estudar” a melhor forma de aprender, às suas irmãs pela ajuda além do possível e a todos familiares e amigos, pela paciência, compreensão e força nos momentos difíceis que permearam a execução deste trabalho, especialmente a Adriana Martins e a Kelly Martins, amigas incansáveis.

Finalmente, gostaria de agradecer a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram de diversas maneiras construtivas, no desenvolvimento deste trabalho, que busca contribuir no engrandecimento do conhecimento técnico.

Ser feliz é deixar de ser vítima dos
problemas e se tornar um autor da própria
história... Pedras no caminho? Guardo todas,
um dia vou construir um castelo.

Fernando Pessoa

Sumário

	página
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Figuras.....	xii
Lista de Símbolos.....	xv
Resumo.....	xviii
Abstract.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 A VIA FÉRREA E O DIMENSIONAMENTO DOS TRILHOS.....	05
2.1 A via férrea, os trilhos e seu desgaste.....	05
2.2 Componentes da superestrutura ferroviária.....	06
2.3 Perfil do trilho.....	09
2.4 Limites de uso.....	11
2.5 Metodologia de dimensionamento dos trilhos.....	17
2.6 Tipos de apoio.....	18
2.7 Carga.....	19
2.8 Processos clássicos de dimensionamento.....	21
2.9 Módulo resistente do trilho.....	28
2.10 Escolha do perfil do trilho.....	30
2.11 Contato roda-trilho.....	31
2.12 Considerações finais.....	36

3 DEFEITOS E DESGASTES.....	39
3.1 Introdução.....	39
3.2 Defeitos originados em serviço	40
3.3 Desgaste.....	47
3.4 Considerações finais.....	60
4 ESTUDO DO DESGASTE DO TRILHO.....	63
4.1 Definição geral do experimento.....	63
4.2 O estudo do desgaste na literatura.....	64
4.3 O estudo do desgaste em campo.....	81
4.4 Uma análise estatística dos desgastes.....	95
4.5 Análise de tensões.....	102
4.6 Avaliação dos resultados.....	111
5 CONCLUSÃO.....	115
Anexos.....	119
Anexo A.....	121
Anexo B.....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133

Lista de Tabelas

	página
2.1 Trilhos fabricados no Brasil.....	10
2.2 Máximo desgaste do boleto.....	13
2.3 Limite de desgaste do boleto para trilhos de segunda-mão.....	15
2.4 Fator t	20
2.5 Coeficientes η e μ	21
4.1 Limites de desgaste.....	66
4.2 Limites de desgaste.....	68
4.3 Limites de desgaste conforme RFFSA.....	69
4.4 Limites de desgaste conforme AREMA.....	73
4.5 Limites de desgaste conforme CPR.....	76
4.6 Ângulos de desgaste.....	79
4.7 Ângulos de desgaste.....	80
4.8 Perfis analisados.....	83
4.9 Perda e média dos momentos de inércia e dos momentos resistentes.....	88
4.10 Comparação entre as equações 4.6 e 4.9.....	93
4.11 Comparação entre as equações.....	94
4.12 Desgastes.....	96

4.13 Histograma desgaste vertical.....	97
4.14 Histograma desgaste horizontal.....	98
4.15 Histograma perda em área do boleto.....	100
4.16 Momentos de inércia e resistentes.....	103
4.17 Comprimento elástico da linha elástica.....	105
4.18 Coeficientes μ	106
4.19 Momentos fletores.....	107
4.20 Cargas dinâmicas.....	108
4.21 Cargas estáticas por eixo.....	109

Lista de Figuras

	página
2.1 Elementos que compõe a via permanente.....	05
2.2 Bitola.....	07
2.3 Perfil “Vignole”.....	09
2.4 Desgaste lateral.....	12
2.5 Desgaste vertical.....	12
2.6 Esquema do gabarito de desgaste do boleto de trilhos.....	14
2.7 Gerenciamento do TR- 57.....	16
2.8 Gerenciamento do TR- 68.....	16
2.9 Método de Zimmermann.....	22
2.10 Esquema para cálculo de b.....	24
2.11 Diagrama mestre de Talbot.....	27
2.12 Geometria da seção transversal do trilho.....	29
2.13 Momento de inércia.....	30
2.14 Superfície de contato roda trilho.....	32
2.15 Contato de 1 ou 2 pontos entre o friso e a roda.....	33
2.16 Ângulo trilho novo.....	35
2.17 Ângulo trilho desgastado.....	35
2.18 Roda nova e trilho usado.....	36
3.1 <i>Squats</i>	42
3.2 <i>Squats</i>	42
3.3 <i>Squats</i> leve, moderado, pesado.....	42
3.4 <i>Head checks</i>	43
3.5 <i>Head checks</i>	43

3.6 Floculação.....	43
3.7 Head checks leve, moderado, pesado e severo.....	44
3.8 <i>Tache ovals</i>	45
3.9 <i>Tache ovals</i>	45
3.10 <i>Shells</i> no boleto.....	45
3.11 <i>Shells</i> no canto da bitola.....	45
3.12 <i>Shells</i> e <i>tache ovals</i>	46
3.13 <i>Laserail</i> ®.....	48
3.14 Corrugação claramente visível.....	50
3.15 Corrugação de onda curta.....	51
3.16 Corrugação de onda longa.....	51
3.17 Carro controle.....	54
3.18 Trem esmerilador MRS.....	58
3.19 Trem esmerilador Speno.....	58
4.1 Desenho simulando desgastes.....	65
4.2 Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia.....	67
4.3 Desenho simulando desgastes verticais e horizontais.....	69
4.4 Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia.....	70
4.5 Desenho simulando desgastes verticais e horizontais.....	72
4.6 Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia.....	73
4.7 Desenho simulando desgastes verticais e horizontais.....	75
4.8 Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia.....	76
4.9 Ângulo da face ativa.....	78
4.10 Desenho simulando ângulos de desgaste.....	78
4.11 Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia.....	80
4.12 Perfil 1 – Aparelho de medição.....	82

4.13 Perfil 1 desgastado- AutoCad®.....	82
4.14 Perfis desenhados em AutoCad®.....	83
4.15 Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia.....	84
4.16 Correlação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia.....	85
4.17 Correlação entre o momento resistente do patim e a perda em área do boleto.....	86
4.18 Correlação entre o momento resistente do boleto e a perda em área do boleto.....	86
4.19 Perfis com a mesma perda em área do boleto.....	87
4.20 Correlação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia.....	89
4.21 Correlação entre o momento resistente do patim e a perda em área do boleto.....	90
4.22 Correlação entre o momento resistente do boleto e a perda em área do boleto.....	90
4.23 Comparação entre as equações 4.6 e 4.9.....	91
4.24 Comparação entre as equações 4.7 e 4.10.....	92
4.25 Comparação entre as equações 4.8 e 4.11.....	92
4.26 Histograma desgaste vertical.....	98
4.27 Histograma desgaste horizontal.....	99
4.28 Histograma perda em área do boleto.....	100
4.29 Variação entre a carga estática por eixo e a perda em área do boleto.....	110

Lista de Símbolos

θ	ângulo de desgaste
c_1	largura do boleto
h	altura da seção do trilho
e	altura da seção do boleto
l_1	largura do patim
L_1, L_2	comprimentos do boleto
α, K	coeficientes de majoração de carga
V	velocidade do veículo
D	diâmetro da roda
Q, D_1	carga dinâmica dos veículos
Q	carga estática isolada
Q_m	carga estática média
t	fator de segurança
\bar{s}	coeficiente de conservação da via
O	coeficiente de velocidade
R_1	fator de risco
b	largura do apoio longitudinal
p, q_1	pressão
c	coeficiente de lastro
y	recalque
L	comprimento elástico da linha elástica
X	distâncias
E	módulo de elasticidade

I, I_x, \bar{I}_x	momento de inércia
M	momento fletor
V_1	força cortante
q	reação de apoio
EI	rigidez vertical
η, μ	coeficientes
l	comprimento do dormente
u	largura da metade da faixa carregada
b_1	largura do dormente
a	espaçamento entre dormentes
f	largura da faixa sem soca
s	largura da bitola mais metade do boleto
q_1	carga
U	módulo da via
F_1, A, S, f_1	áreas
W	módulo ou momento resistente
a_1	distância da linha neutra à fibra extrema
σ	tensão atuante
σ_{adm}	tensão admissível no boleto
σ_1	superfície de contato
n	peso
T	tráfego anual
R	raio da roda
r	raio de arredondamento do boleto
τ	tensão de cisalhamento

Y, L_1	força lateral
V_2	força vertical
pd	perda em área do boleto

As definições apresentadas nesta lista são de ordem geral, estando as mesmas indicadas no texto.

Resumo

SEMPREBONE, Paula da Silva. Desgastes em trilhos ferroviários – Um estudo teórico. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 2005. n° pág.137. Dissertação.

O assunto a ser abordado nesta pesquisa refere-se ao componente da superestrutura ferroviária trilho, especificamente aos defeitos que nele se verificam em consequência de sua utilização como guia para o material rodante e transmissor de esforços decorrentes do movimento do veículo, e do desgaste do contato roda-trilho. A importância de se realizar este estudo fundamenta-se na necessidade de se conhecer detalhadamente os defeitos e o limite de desgaste do trilho, que permitem determinar sua vida útil, para que se possa evitar ao máximo sua substituição, devido ao alto custo envolvido, além da 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. Busca-se, ainda, encontrar uma justificativa para o valor limite de desgaste adotado atualmente no meio ferroviário, que corresponde a 25% de perda em área do boleto do trilho, através de simulações do desgaste utilizando-se um modelo computacional, além de rotinas de cálculo que permitam verificar se esse parâmetro é restrição do ponto de vista do dimensionamento do trilho. Pretende-se, assim, através desta pesquisa proporcionar uma contribuição ao meio ferroviário, avaliando-se se o limite de desgaste adotado mostra-se adequado à realidade ferroviária.

Palavras-chave: ferrovia, via permanente, trilho, desgaste de trilho, defeitos de trilho.

Abstract

SEMPREBONE, Paula da Silva. Wear in railway tracks - A theoretical study. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 2005. n° pág.137. Dissertação.

The matters concerned in this research particularly refer to damages caused by stress while using tracks on permanent railways as guide and strain transmitter of the vehicles. Importance is attached to this study based on the need of understanding deep and in detail the faults and wear limits on the tracks, which allow determining its period of use, so that substitution may be avoided due to its high costs. Furthermore, the railway safety may be weakened depending on the sort of wear. This study has basis on a bibliographical research aiming to gather information and possible works on this field in order to solve the problems mentioned above, as well as finding proofs for the current wear rate accepted in the railway field, which is 25% of track area decrease, throughout wear simulations on a computer based model, besides calculations which allow stating whether this standard depends on the track size. This work claims to contribute to the railway field evaluating if the adopted wear rate meets our railway reality.

Keywords: railway, permanent track, track, rail wear, defaults.

1 INTRODUÇÃO

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, 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, principalmente, 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 elementos, sendo que as tensões de contato, que ocorrem numa pequena área, são responsáveis pelo surgimento de muitos defeitos nos trilhos.

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 e muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas em diversos países neste sentido.

Tais pesquisas incluem 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, para 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. 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. Atualmente é admissível que o trilho sofra um desgaste correspondente à perda de 25% em área do boleto (cabeça do trilho).

No entanto, há na literatura uma carência de uma justificativa para este valor. O objetivo desta pesquisa é verificar se o limite de desgaste do boleto aceito hoje está adequado à realidade ferroviária e encontrar uma justificativa para o valor adotado.

O estudo foi desenvolvido em duas partes. Na primeira, foram verificados os desgastes máximos propostos por vários autores consultados, procurando estabelecer uma relação entre os limites de desgaste estabelecidos por eles, em milímetros de perda vertical e horizontal do boleto, com a perda em porcentagem de área do boleto. Na segunda parte, objetivou-se encontrar uma equação para relacionar a perda em área do boleto, que pode ser obtida diretamente em campo através de um aparelho de medição, denominado perfilógrafo, com o momento de inércia do perfil, pois a partir deste pode-se calcular as tensões atuantes e assim avaliar as condições do trilho, comparando-as com as tensões admissíveis.

Para desenvolver essa primeira parte do estudo, o perfil do trilho foi desenhado no programa de desenho AutoCad e foram simulados os desgastes estabelecidos pelos autores pesquisados. A seguir, calculou-se a perda em área do boleto para cada simulação.

Para a segunda parte da pesquisa, foram analisados perfis em uso em uma linha férrea, cujo desgaste foi medido por um aparelho que fornece a perda em área destes perfis em formato *Portable Document Format* (PDF). Estes perfis foram então redesenhados no programa de desenho AutoCad. Calcularam-se, a seguir, os momentos de inércia correspondentes e, definiu-se

a equação que relaciona a perda do boleto com o momento de inércia do perfil, calculando-se as tensões correspondentes às perdas do boleto.

Dessa forma, pretende-se, com esta pesquisa, contribuir com o meio ferroviário, avaliando se o limite de desgaste adotado é adequado à realidade ferroviária e propondo uma equação que permita que se encontre o momento de inércia do perfil, a partir da medição do desgaste feita diretamente em campo com o perfilógrafo, através da obtenção da perda em área do perfil, possibilitando assim a análise direta das condições do trilho através do cálculo da tensão.

É conveniente também ressaltar que a equação proposta está adequada à realidade ferroviária, uma vez que foi obtida através de uma grande amostra de perfis em uso, sujeitos ao desgaste, em linhas da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), porém restrito ao perfil TR-57, objeto desta pesquisa.

No capítulo seguinte são apresentados os principais elementos que constituem a via férrea e os processos clássicos para dimensionamento de trilhos. Nele se encontra o processo para a escolha do trilho através das tensões atuantes em função da carga aplicada, além de analisar como se dá o contato roda-trilho.

No capítulo III são apresentados os defeitos mais comuns decorrentes do uso da via e os desgastes que afetam os trilhos. São, também, levantadas as medidas para prevenção e tratamento, sendo apresentadas as pesquisas desenvolvidas para atenuar estes problemas.

No capítulo seguinte, IV, relata-se a parte experimental da pesquisa, a metodologia utilizada, assim como os resultados obtidos e sua discussão.

Finalmente, o capítulo V apresenta a conclusão deste trabalho e sugestões para futuras pesquisas.

2 A VIA FÉRREA E O DIMENSIONAMENTO DOS TRILHOS

2.1 A via férrea, os trilhos e seu desgaste

A via férrea é composta pela infra-estrutura, plataforma e o maciço adjacente, e pela superestrutura viária, via permanente, cujos elementos que a compõe são os trilhos, os dormentes, o lastro e o sublastro (figura 2.1).

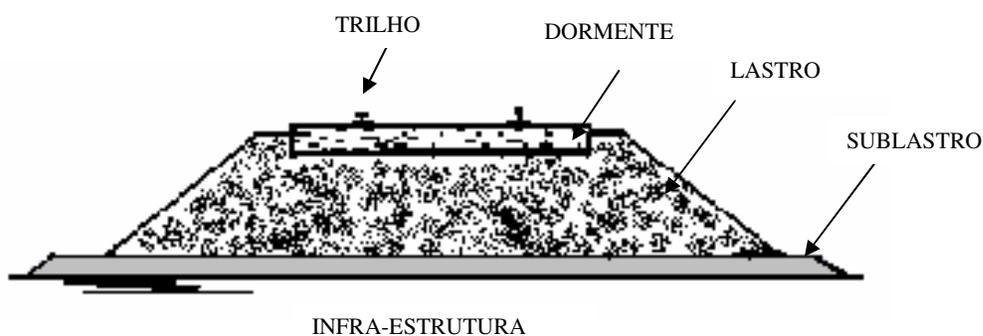


Figura 2.1- Elementos que compõe a via permanente

A superestrutura viária 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 (1), 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 (2), 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 (2).

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 (2), Stopatto (3) e Batist (4) e aceitas atualmente estabelecem um limite de desgaste de 25% da área do boleto. Este valor não se apresenta claramente explicado ou fundamentado, o que justifica a presente pesquisa.

2.2 Componentes da superestrutura ferroviária

A via permanente é constituída por sublastro, lastro, dormente, trilho e fixações.

O sublastro é o elemento que está ligado à infra-estrutura da via. Sua utilização depende do tipo de solo da plataforma. Para Paiva (5), é empregado quando houver necessidade de impedir a penetração do solo da plataforma no interior do lastro, ou 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 freqüentemente 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 (5).

Por sua vez, aos dormentes cabem receber os esforços produzidos pelas cargas dos veículos e transmiti-los ao lastro, servindo de suporte para os trilhos e permitindo sua fixação. Também têm por função garantir uma bitola constante e uniforme em toda extensão da via. O principal tipo de dormente empregado é o de madeira, pois, de acordo com Brina (2), a madeira reúne quase todas as qualidades essenciais para a função.

Já a bitola, segundo definição de Schramm (6), é a distância entre os dois trilhos da linha, medida de 12 a 16 mm abaixo da superfície de rolamento do boleto (ver figura 2.2). Varia conforme o país, sendo que, no Brasil, são adotadas as seguintes bitolas: 1,00 m; 1,435 m, 1,60 m e bitolas mistas (2).

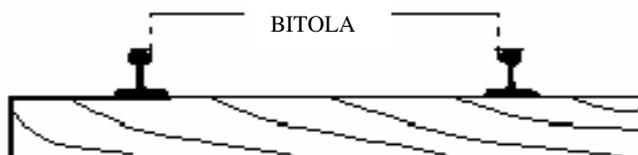


Figura 2.2 - Bitola

Quando o trilho sofre desgaste ou é deformado pelo tráfego, geralmente há inversão de lado, ou seja, o trilho é aproveitado na outra fila. Deve-se, contudo, estar atento a este caso, pois uma alteração na abertura de bitola pode causar descarrilamento do trem (7).

Quanto a essas diferenças de abertura, é importante destacar que, segundo Macedo (8), os trilhos de vias de bitola larga sofrem maior desgaste nas curvas que os trilhos de vias com bitola menor. O motivo desse desgaste é o microescorregamento das rodas, pois o comprimento de trilho que a roda externa percorre em curva é maior que o caminho percorrido pela roda interna. Dessa forma, como o número de rotações das rodas é o mesmo, pois têm o mesmo diâmetro e estão solidárias através de um eixo, resulta no escorregamento da roda externa, no

sentido do movimento do veículo, em relação à roda interna, que também sofre escorregamento no sentido contrário ao movimento, procurando trazer o rodeiro para uma posição radial.

Segundo Villa (9), a conicidade das rodas não compensa essa dificuldade, pois as rodas ficam inclinadas em relação ao trilho, formando um ângulo entre o flange da roda e a linha de bitola do trilho externo, denominado ângulo de ataque, o que gera as chamadas forças de microescorregamento.

No caso da bitola maior, o truque pode se inscrever mais facilmente na curva, porém este fica mais inclinado em relação ao trilho, aumentando as solicitações no veículo e na via, gerando, por consequência, maior desgaste nesses trilhos. Isto pôde ser comprovado nos estudos de Rodrigues Filho e Villa (10), em que foram analisadas as forças que ocorrem no contato entre as rodas e os trilhos, quando o veículo descreve uma curva de raio constante, através de uma simulação computacional.

Por sua vez os trilhos, como já citado anteriormente, 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. São compostos por dois perfis metálicos paralelos mantidos pelos dormentes.

Para realizar suas funções, os trilhos devem ter dureza, tenacidade, elasticidade e resistência à flexão. O material mais adequado para atender a estas características é o aço.

Os trilhos, ainda, 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 (11).

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 (12). 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 (13) 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.

2.3 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 (14) e apresentado na figura 2.3.

A NBR 7650 (15) 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.

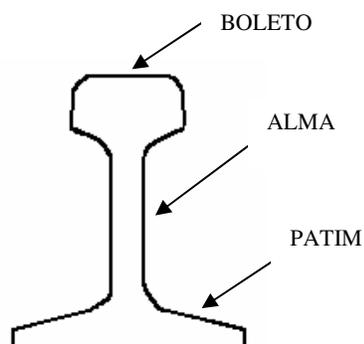


Figura 2.3 - Perfil “Vignole”

Os trilhos fabricados no Brasil, apresentados na tabela 2.1, são classificados e denominados conforme seu peso por unidade métrica. O valor numérico de seu nome equivale ao peso aproximado em kg/m do perfil.

Com o intuito de melhor utilização e redução de desgaste do trilho, este é assentado com uma inclinação na razão de 1:20 sobre a vertical. Foi observado que uma inclinação de 1:40 apresenta maior resistência ao desgaste que a inclinação de 1:20. Assim, as condições de contato entre a roda e o boleto permanecem as mesmas por mais tempo (16). Esta inclinação foi adotada na Alemanha.

Tabela 2.1 - Trilhos fabricados no Brasil

		Trilhos							
Tipo nominal brasileiro - TR		25	32	37	45	50	57	68	
Tipo correspondente americano		5040 ASCE	6540 ASCE	7540 ASCE	9020 ARA-A	10025 AREMA	11525 AREMA	13637 AREMA	
Peso calculado, em kg/ m		24,654	32,045	37,105	44,645	50,349	56,897	67,560	
Peso calculado, em lb/ jardas		49,7	64,6	74,8	90,0	101,5	114,7	136,2	
Área calculada da seção (cm ³)	Boloeto	área	13,23	17,16	19,87	20,58	24,51	25,22	31,35
		% do total	42	42	42	36,2	38,2	34,8	36,3
	Alma	área	6,58	8,58	9,94	13,6	14,52	19,68	25,53
		% do total	21	21	21	24	22,6	27,1	27,3
	Patim	área	11,6	15,18	17,48	22,64	25,16	27,68	31,42
		% do total	37	37	37	39,8	39,2	38,1	36,4
Área total		31,42	40,84	47,29	56,98	64,19	72,58	86,3	
Momento de inércia (cm ⁴)		413,7	783,4	951,5	1610,8	2039,5	2730,5	3950,0	
Módulo de resistência (cm ³)	Boloeto	81,6	120,8	149,1	205,6	247,4	295,0	361,6	
	Patim	86,7	129,5	162,9	249,7	291,7	360,7	463,8	
Raio de giração (cm)		3,63	4,15	4,49	5,32	5,63	6,13	7,11	

Fonte: Brina (2)

Os croquis-padrão dos trilhos geralmente usam três raios para definir o boleto, formado por partes de três circunferências. Estudos desenvolvidos pela European Rail Research Institute

(ERRI) têm investigado o significado de definir o perfil do boleto do trilho e especificar a tolerância significativa que pode ser aplicada ao perfil definido desta forma, pois o boleto é fundamental para determinar as condições de contato roda-trilho (17).

O sistema de coordenadas polar e cartesiana tem sido investigado para descrever o desenho perfeito do perfil baseado nas tensões de contato. O sistema de coordenadas polares, no entanto, se mostrou o mais adequado para melhor definição dos perfis (17).

Os perfis dos trilhos cotados com suas respectivas dimensões são apresentados pela NBR 12320 (18). Os perfis correspondentes americanos, por sua vez, são apresentados no manual da American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA) (19). A NBR 12399 (20) estabelece as tolerâncias dimensionais dos trilhos novos, que são de $\pm 0,7$ milímetros para altura, $\pm 1,6$ milímetros para largura, $\pm 0,5$ para largura do boleto, $\pm 1,6$ milímetros para assimetria e ± 1 milímetro para espessura da alma, para o trilho TR-57.

2.4 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 (21). 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 (22), 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 (3), 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.

De acordo com Brina (2), 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 θ (figura 2.4) 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 c_1/e é de aproximadamente 1,6 a 1,8 (figura 2.5). A relação ideal h/l_1 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.

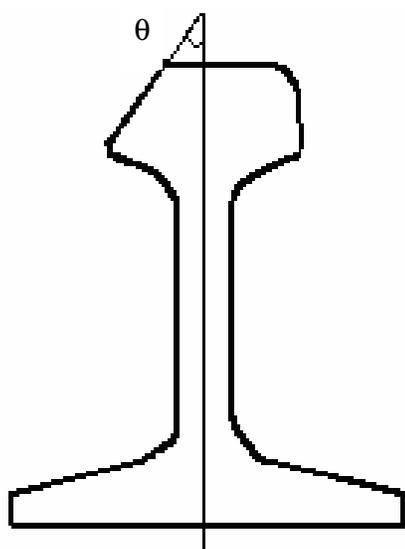


Figura 2.4 - Desgaste lateral

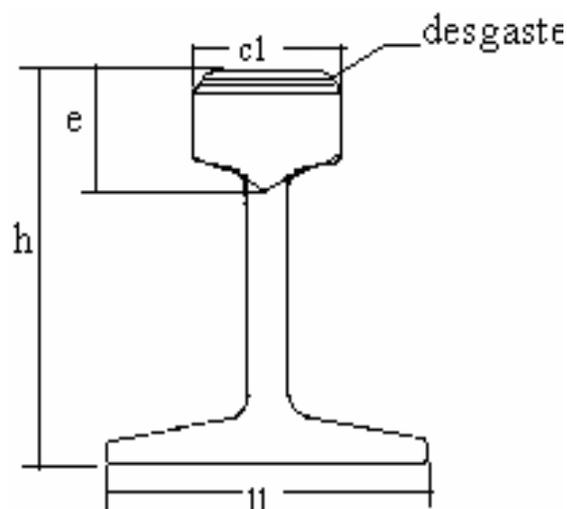


Figura 2.5 - Desgaste vertical

Ainda segundo Brina (2), 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 horizontais para o boleto conforme a tabela 2.2. O valor do desgaste máximo é dado pela soma do desgaste vertical com metade do desgaste horizontal (23 apud 4). O trilho deverá ser substituído quando o desgaste máximo total ou o desgaste vertical for atingido.

Tabela 2.2 – 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 1,620 m e 1,020 m respectivamente. A tabela 2.2 pode ser utilizada também para avaliação das possibilidades de reemprego dos trilhos (23 apud 4).

Um gabarito manual é usado pela RFFSA para verificação do desgaste horizontal do boleto (figura 2.6). 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 L_1 e L_2 da figura 2.6 necessários à confecção dos gabaritos são estabelecidos por norma em função do tipo de trilho.

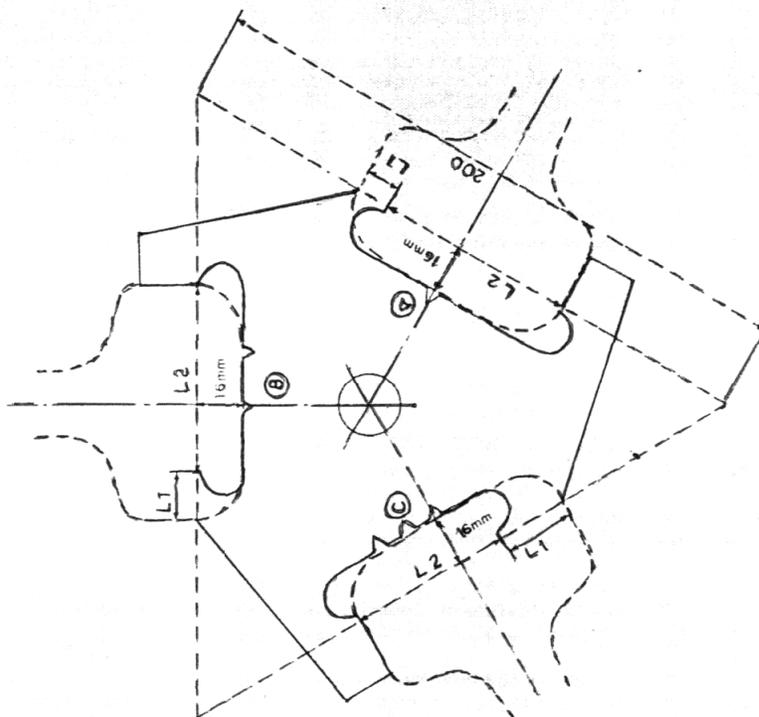


Figura 2.6 – Esquema do gabarito de desgaste do boleto de trilhos. Fonte: RFFSA (23 apud 4)

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 2.3 (24).

Tabela 2.3 – 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 (24)

Segundo Roney (25 apud 24), a Canadian Pacific Railroad (CPR) faz o gerenciamento dos desgastes dos trilhos TR- 57 e do TR- 68 conforme reproduzido nas figuras 2.7 e 2.8.

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 (21). 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.

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.

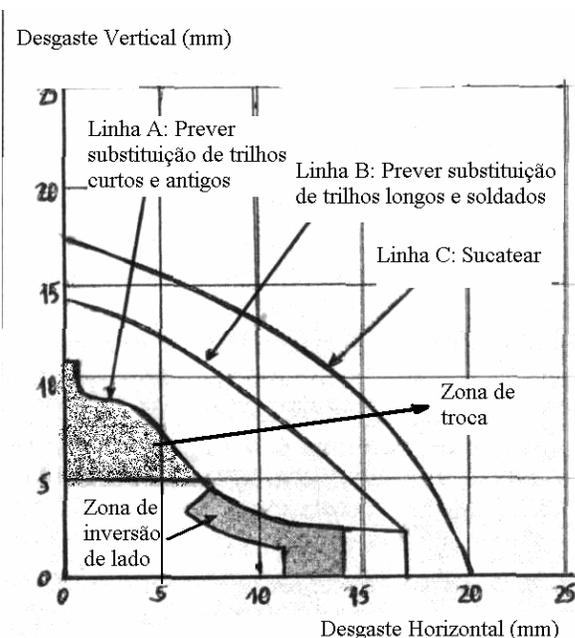


Figura 2.7 – Gerenciamento do TR-57 (24)

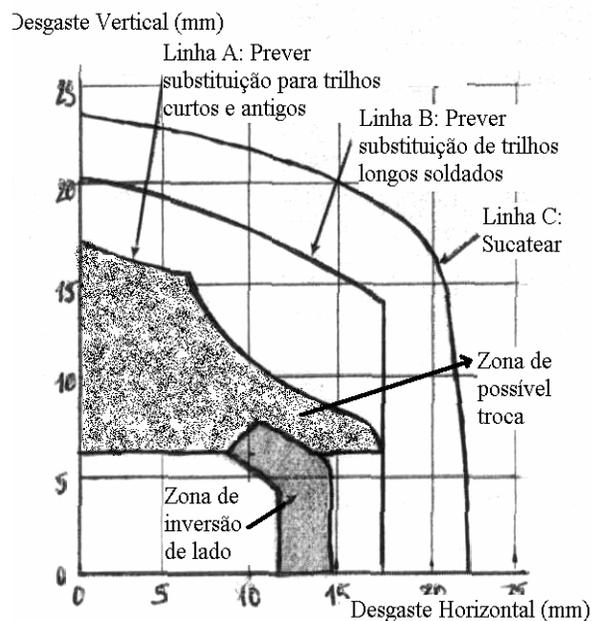


Figura 2.8 – Gerenciamento do TR-68 (24)

A Canadian Pacific Railway (CPR) também desenvolveu um projeto, na rota do carvão de 1.100 km na British Columbia, para aumentar os limites de desgaste do trilho. Nesse projeto, utilizou-se aço mais endurecido para os trilhos, aprimorando o processo metalúrgico. O trilho foi repetidamente reperfilado para manter o perfil otimizado, que tinha sido definido através das tensões de contato roda-trilho. Fez-se o esmerilamento, sendo que o nível de desgaste em cada curva foi controlado através de medição regular, tendo sido os trilhos inspecionados por ultrassom, para controlar o risco de defeitos internos, e as taxas de desgaste do material foram analisadas para se determinar o momento de remoção do trilho (26).

Segundo Roney e Meyler (26), 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.

2.5 Metodologia de dimensionamento dos trilhos

Para um dimensionamento adequado dos trilhos é necessário o conhecimento da resposta mecânica da via férrea às ações do tráfego. O estudo teórico da deformação de uma via é de grande complexidade, pois envolve muitas variáveis, as quais fazem com que as ações do tráfego tenham um caráter aleatório e repetitivo, não permitindo uma representação matemática em forma simples. Algumas destas variáveis são a espessura, a disposição e natureza do lastro, a natureza da plataforma, as diferentes dimensões e rigidez dos elementos envolvidos e a variação das características resistentes dos elementos (1).

Os processos de cálculo normalmente utilizados nesses estudos, que serão apresentados adiante, sofreram simplificações para permitir sua aplicação e têm apresentado bons resultados durante décadas. Diante destes resultados, não se justificam maiores sofisticções.

Conforme Rives; Pita e Puente (1), o dimensionamento da via é feito de acordo com as solicitações, devido a cargas pontuais isoladas que atuam de forma estática na direção vertical em vez de se considerar o caráter dinâmico das solicitações, o que proporciona resultados satisfatórios, na prática, para velocidade até 200 km/h.

No cálculo das tensões que atuam na via permanente, para Schramm (6), é mais importante a comparação do comportamento de diferentes tipos de carga, perfis de trilho e distância entre dormentes que a verdadeira grandeza das tensões, devido à dificuldade de uma determinação precisa dos esforços que atuam na via provenientes da passagem do veículo.

A resposta da via à passagem dos veículos é, para Rives; Pita e Puente (1), uma flexão do trilho e dos dormentes, e uma compressão no sistema lastro-plataforma. Os processos clássicos para o estudo do estado tensão-deformação originado pela flexão dos elementos da via são os métodos de Zimmermann, de Talbot, de Timoshenko e de Timoshenko-Saller-Hanker.

A teoria de Hertz, por sua vez, permite que se determinem aproximadamente as solicitações que surgem como consequência do contato roda-trilho.

2.6 Tipos de apoio

Dois grupos principais de teorias podem ser citados no cálculo dos esforços decorrentes da passagem do veículo na via por flexão do trilho e dos dormentes. O primeiro agrupa os estudos realizados com a hipótese de assimilação da via a uma viga contínua, onde os dormentes são representados por apoios equidistantes. O segundo reúne os estudos que consideram a via como uma viga apoiada de maneira contínua e uniforme (1). Não há praticamente diferenças entre os dois grupos para os espaçamentos adotados hoje em dia.

No método de Winkler, a hipótese foi a de que o trilho era uma viga contínua sobre apoios rígidos. Esta situação não tem aplicação prática, segundo Brina (2), a não ser em algumas obras de concreto ou em pontes sem estrado contínuo. Posteriormente, Winkler propôs uma expressão considerando a proporcionalidade entre pressões e recalques que seria utilizada no método de Zimmermann.

Assim, os métodos baseados na hipótese de apoio contínuo e uniforme do trilho, considerando os dormentes como apoios elásticos, são os que mais se aproximam da realidade, pois consideram a elasticidade do lastro e da plataforma. Destas teorias se destacam os métodos de Zimmermann, de Talbot, de Timoshenko e de Timoshenko-Saller-Hanker.

2.7 Carga

As cargas dos veículos solicitantes conhecidas são estáticas, originadas pelo peso dos veículos, quando estes estão parados sobre a via. Com o movimento deles, essas cargas passam a ser dinâmicas, e a diferença entre as cargas estática e a dinâmica é significativa e não deve ser desprezada.

A carga estática é transformada em dinâmica através de um coeficiente de majoração. Existem vários métodos para o cálculo deste coeficiente, que consideram parâmetros bem diferentes.

Schramm (6) indica a expressão 2.1 para o cálculo do coeficiente de majoração da carga α , onde V é a velocidade em km/h.

$$\alpha = 1 + \frac{4,5 \cdot V^2}{100\,000} - \frac{1,5 \cdot V^3}{10\,000\,000} \quad (2.1)$$

Considerando uma velocidade de 60 km/h, o coeficiente de majoração da carga estática, conforme a equação 2.1 seria de 1,16. Tendo uma velocidade de 200 km/h, o coeficiente de majoração da carga estática seria de 2,79.

A American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA) recomenda, segundo Paiva (5), a expressão 2.2, onde K é o coeficiente de majoração da carga, V, a velocidade em km/h e D, o diâmetro da roda em polegadas.

$$K = 1,237 (V/D)^{0,243} \quad (2.2)$$

O coeficiente de majoração da carga estática, neste caso, depende do diâmetro da roda, além da velocidade do veículo.

Ainda para o cálculo da carga dinâmica Q , a fórmula proposta por Eisenmann (27) considera parâmetros importantes como o risco, a velocidade de operação e o estado de conservação da via férrea para compor o coeficiente de majoração da carga estática média Q_m , conforme as expressões 2.3 a 2.8:

$$Q = Q_m (1 + t \cdot \bar{s}) \quad (2.3)$$

$$\bar{s} = 0,1 \cdot O, \text{ para superestruturas em excelentes condições} \quad (2.4)$$

$$\bar{s} = 0,2 \cdot O, \text{ para superestruturas em boas condições} \quad (2.5)$$

$$\bar{s} = 0,3 \cdot O, \text{ para superestruturas em más condições} \quad (2.6)$$

$$O = 1, \text{ para velocidade} \leq 60 \text{ km/h} \quad (2.7)$$

$$O = 1 + ((V - 60) / 140), \text{ para } 60 < \text{velocidade} < 200 \text{ km/h} \quad (2.8)$$

O fator de segurança t , na fórmula 2.3, depende do risco R_1 , conforme a tabela 2.4, baseada na distribuição normal de Gauss.

Tabela 2.4 – Fator t

R_1 (%)	0	68,3	80,0	90,0	95,0	95,5	98,0	99,7
t	0	1	1,20	1,65	1,96	2	2,33	3

Fonte: Eisenmann (27)

Conforme Eisenmann (27), para o dimensionamento do perfil do trilho, uma certeza estatística de 99,7% para o fator de risco, ou seja, $t = 3$, é a mais recomendada visando à segurança de operação. Para o cálculo das tensões no lastro pode-se partir de um fator entre 68,3% e 99,7%, portanto, t entre 1 e 3, dependendo da qualidade requerida pela via. Avaliando as tensões no subleito, utilizar um fator de 68,3%, $t = 1$ é adequado em vista da superposição de efeitos dos dormentes adjacentes

Considerando um fator de risco baixo ($t = 1$), velocidade de 60 km/h e superestrutura excelente, por exemplo, o fator de majoração da carga estática, conforme equação 2.3 seria de 1,10, portanto, o mais baixo possível. Para a situação inversa, dada por fator de risco alto ($t = 3$), velocidade de 200 km/h e superestrutura ruim, o coeficiente seria o maior possível, igual a 2,8, o que resultaria na maior diferença entre as cargas dinâmicas e estáticas.

Comparando-se os valores para os coeficientes de majoração da carga estática, obtidos através das equações 2.1 e 2.3, conforme citado acima, observa-se que o menor valor obtido pela equação 2.1 é de 1,16, enquanto que pela equação 2.3 é de 1,10 e que o valor mais alto obtido pela equação 2.1 e 2.3 são, respectivamente, 2,79 e 2,80, portanto, as duas equações resultam em valores muito próximos.

2.8 Processos clássicos de dimensionamento

Os processos clássicos de dimensionamento do trilho, conforme Rives; Pita e Puente (1), são os métodos de Zimmermann, Talbot, Timoshenko e Timoshenko-Saller-Hanker, que serão apresentados a seguir.

O primeiro deles, método de Zimmermann, considera a via férrea apoiada em apoios discretos, mas para efeitos de cálculo a via é admitida como apoiada sobre uma sapata corrida de largura b , conforme a figura 2.9. Sobre a via atua uma carga pontual Q estática isolada que representa as ações do tráfego, de forma simplificada.

Este método permite considerar a influência na deformação da via de qualquer esquema de cargas utilizando o princípio da superposição, que representem as condições reais de tráfego, de modo satisfatório.

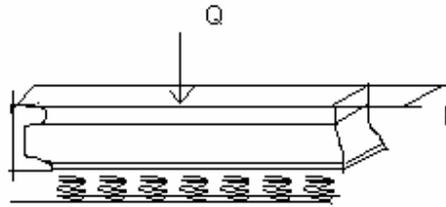


Figura 2.9 - Método de Zimmermann

Zimmermann considerou que a via se deforma conforme a expressão 2.9, proposta por Winkler.

$$p = c \cdot y \quad (2.9)$$

O p é pressão atuante em kg/cm^2 que provoca o recalque y em cm e c é o coeficiente de lastro em kg/cm^3 .

O coeficiente de lastro depende da natureza e composição do lastro, do solo e da geometria da grade. Segundo Paiva (5), é um indicador do padrão da via. Através de muitas experiências, concluiu-se que seus valores estão compreendidos entre 2 e 50 kg/cm^3 . Eisenmann (27) recomenda utilizar os valores de 2, 5 e 10 kg/cm^3 para superestrutura ruim, boa e muito boa, respectivamente.

L é definido como o comprimento elástico da linha elástica, conforme a equação 2.10, e x é a distância entre o ponto de aplicação da carga Q e o ponto considerado. A relação x/L é denominada ξ .

$$L = \sqrt[4]{4EI/bc} \quad (2.10)$$

E é o módulo de elasticidade do trilho, em kg/cm^2 , I é o momento de inércia do trilho considerado, em cm^4 , apresentados na tabela 2.1, b é a largura do apoio longitudinal contínuo, em cm e c é o coeficiente do lastro, em kg/cm^3 .

Pela resistência dos materiais, sabe-se que $dM = V_1 dx$ e $dV = -q dx$, sendo M o momento fletor, V_1 a força cortante e q a reação de apoio da viga (28). O momento fletor é dado por $M = EI \cdot D^2 y / dx^2$, onde EI é a rigidez vertical do trilho. Combinando estas equações e resolvendo a equação diferencial integrada, deduzem-se as expressões 2.11 para o cálculo do recalque, 2.12 para o cálculo do momento, e 2.13 para o cálculo da pressão p atuante sobre a face de cada dormente (1).

$$y = \frac{Q}{2bc} \cdot \frac{1}{L} \cdot e^{-x/L} (\cos x/L + \sen x/L) \quad (2.11)$$

$$M = \frac{Q}{4} \cdot L \cdot e^{-x/L} (\cos x/L - \sen x/L) \quad (2.12)$$

$$p = c \cdot y = \frac{Q}{2b} \cdot \frac{1}{L} \cdot e^{-x/L} (\cos x/L + \sen x/L) \quad (2.13)$$

O valor $\{e^{-x/L} \cdot (\cos x/L + \sen x/L)\}$ da expressão 2.11 é chamado de η enquanto o valor $\{e^{-x/L} \cdot (\cos x/L - \sen x/L)\}$ da expressão 2.12 é chamado μ , reduzindo as expressões 2.11, 2.12 e 2.13, as expressões 2.14, 2.15 e 2.16 (27).

Os valores de η e μ dependem da relação x/L . No ponto de aplicação da carga, x é zero e η e μ assumem seu valor máximo, igual a 1. Neste ponto, o momento e a deformação são, portanto, máximos.

$$y = \frac{Q}{2bc} \cdot \frac{1}{L} \cdot \eta \quad (2.14)$$

$$M = \frac{Q}{4} \cdot L \cdot \mu \quad (2.15)$$

$$p = c \cdot y = \frac{Q}{2b} \cdot \frac{1}{L} \cdot \eta \quad (2.16)$$

Buscando uma aplicação prática para as equações de Zimmermann, foi proposto por Timoshenko, Saller e Hanker um modelo teórico para transformar os dormentes transversais (apoios discretos) em uma sapata corrida (apoio contínuo) equivalente.

Segundo Rives; Pita e Puente (1), se o suporte que a via oferece ao trilho for igual ao que a sapata situada entre os dormentes oferece, a via sobre dormentes pode assimilar-se a uma via sobre sapata corrida. Sendo o trabalho do trilho o mesmo, a superfície de apoio que os dois sistemas oferecem deve ser igual, o que resulta na equação 2.17, conforme a figura 2.10, sendo l o comprimento do dormente, $2u$ a largura da faixa carregada, f a faixa central não carregada, s a distância entre os eixos dos trilhos, a o espaçamento entre dormentes, b a largura da sapata corrida e b_1 a largura do dormente, todos medidos em cm.

$$2 \cdot u \cdot b_1 = b \cdot a \quad (2.17)$$

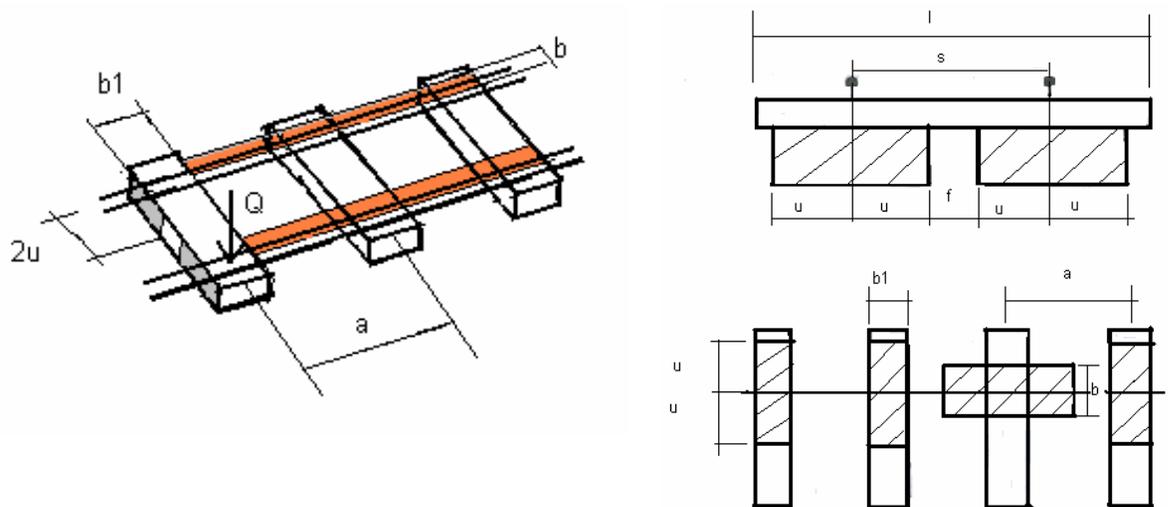


Figura 2.10 – Esquema para cálculo de b

O valor de u varia de metade da largura até o valor extremo no qual atinge a extremidade do dormente. Conforme Paiva (5), o critério alemão considera que u atinge a extremidade do dormente, com isso se definem as equações 2.18, 2.19 e 2.20. A variável s está relacionada com a bitola da via.

$$f = 2s - l \quad (2.18)$$

$$u = (l - s)/2 \quad (2.19)$$

$$u = (s - f)/2 \quad (2.20)$$

A largura da faixa central não carregada, ou seja, a faixa sem soca é definida pela NBR 7914 (29) e está relacionada com a área de apoio dos dormentes. Esta medida varia de 0,30 a 0,40 m, dependendo da bitola. Comparando o resultado obtido pela equação 2.18 com o valor mínimo dado pela norma verifica-se se o critério alemão é atendido. Satisfeita esta condição, u é obtido pela expressão 2.19. Não sendo válido o critério alemão, f é adotado segundo a norma, e u é obtido a partir da expressão 2.20.

O espaçamento entre dormentes pode variar de 0,45 m a 0,80 m. É definido pela NBR 12198 (30) em função do tipo de trilho e da fixação utilizada. Para Eisenmann (27), o efeito desta variável é pouco evidente.

As medidas do dormente de madeira (largura b_1 , altura e comprimento) são definidas pela NBR 7511 (31) e estão relacionadas com a bitola empregada. A largura b_1 varia de 0,22 m a 0,24 m.

O método de Talbot considera que uma carga originada por um grupo de rodas se distribui sobre os dormentes adjacentes de forma decrescente, em que a parte da carga proporcional para cada dormente é função da rigidez do trilho, do tamanho, rigidez e espaçamento entre os dormentes (32).

O método é análogo ao método de Zimmermann, mas, ao invés de admitir a hipótese de Winkler, supõe que existe um coeficiente U chamado módulo da via, que incorpora o efeito da grade, cujo significado físico corresponde a uma carga que, atuando de forma uniforme ao longo de uma linha (trilho), produz um recalque unitário. O coeficiente U pode ser definido, segundo Rives; Pita e Puente (1), pela expressão 2.21.

$$q_1 = U \cdot y \quad (2.21)$$

Sendo q_1 é a carga atuante sobre a unidade de comprimento do trilho, U é o módulo da via e y é o recalque do trilho, que, para obter U , deve ter valor unitário.

L é definido conforme a equação 2.22 e x é a distância entre o ponto de aplicação da carga pontual Q e o ponto considerado.

$$L = \sqrt[4]{4 E I / U} \quad (2.22)$$

Resolvendo de forma análoga à utilizada no método de Zimmermann, sendo $dM = V dx$ e $dV = -q_2 dx$ e sabendo-se que o momento fletor é dado por $M = EI \cdot D^2 y / dx^2$, combinando estas equações e resolvendo a equação diferencial integrada, deduzem-se as expressões 2.23 para o cálculo do recalque, 2.24 para o cálculo do momento e 2.25, para o cálculo da pressão q_2 que atua em cada ponto do suporte do trilho (1).

$$y = Q \cdot \sqrt[4]{1 / (64 E I U^3)} \cdot e^{-x/L} (\cos x/L + \sen x/L) \quad (2.23)$$

$$M = Q \cdot \sqrt[4]{(E I) / (64 U)} \cdot e^{-x/L} (\cos x/L - \sen x/L) \quad (2.24)$$

$$q_2 = Q \cdot \sqrt[4]{U / (64 E I)} \cdot e^{-x/L} (\cos x/L + \sen x/L) \quad (2.25)$$

A figura 2.11 apresenta o diagrama-mestre que permite calcular os recalques do trilho e os momentos atuantes ao longo deste. Do diagrama, conclui-se que o momento máximo ocorre na origem, e é nulo para x_1 , dado por 2.26. O recalque é nulo na seção x_2 , expresso por 2.27.

$$x_1 = \pi / 4 \sqrt[4]{4 E \cdot I / U} \quad (2.26)$$

$$x_2 = 3 \pi / 4 \sqrt[4]{4 E \cdot I / U} = 3 \cdot x_1 \quad (2.27)$$

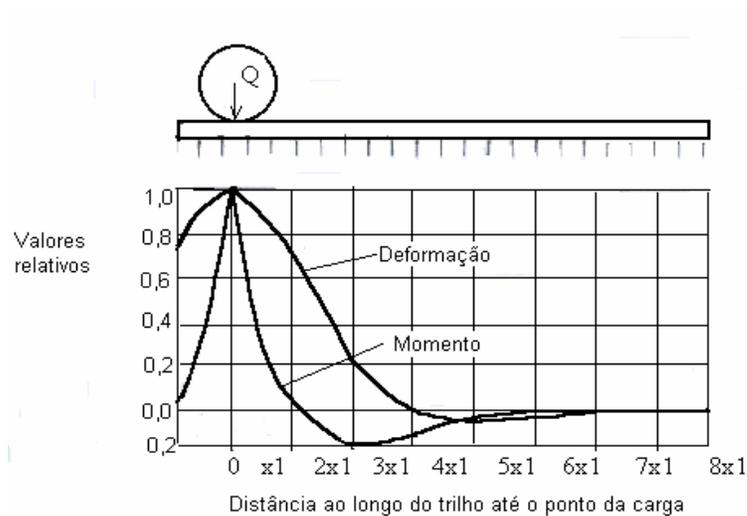


Figura 2.11 – Diagrama mestre de Talbot- Fonte: Rives; Pita e Puente (1)

Os valores relativos para a deformação e o momento representados na ordenada do diagrama-mestre são os valores de η e μ , respectivamente. Observa-se que estes valores variam de 1,0 a $-0,2$.

Quando há rodas múltiplas, podem-se obter as curvas de momentos fletores e deformações por superposição, segundo Guimarães (32), a partir da soma algébrica das ordenadas de cada curva individual que é determinada em função da posição que cada roda ocupa. Quanto maior o espaçamento entre as rodas, maiores os valores dos momentos e das deformações, porque as rodas tendem conseqüentemente a atuar como rodas separadas.

No método conhecido como de Timoshenko supõe-se que a carga que suporta o dormente é igual a que atua no trilho entre os dormentes consecutivos. Aproximadamente, a carga D_1 aplicada em um dormente isolado produz um recalque unitário, conforme a expressão 2.28. (1)

$$D_1 = U \cdot a \quad (2.28)$$

O espaçamento entre dormentes é expresso por a , U é o módulo da via e D_1 pode ser definido segundo a expressão 2.29.

$$D_1 = c \cdot \alpha_1 \cdot F_1 \quad (2.29)$$

O coeficiente do lastro é c , α_1 o fator que leva em conta a flexibilidade e a área de apoio do dormente. O fator α_1 pode ser adotado, segundo Rives; Pita e Puente (1), como 0,8 para dormentes de madeira e 1,0 para dormentes de concreto.

Assim, das expressões 2.28 e 2.29, se deduz a expressão 2.30 que, aplicada nas expressões de Talbot, permitem obter os valores de deformação e momento fletor, de acordo com 2.31 e 2.32.

$$U = c \cdot \alpha_1 \cdot F_1 / a \quad (2.30)$$

$$y = Q \cdot \eta \cdot \sqrt[4]{1 / (64 E I (c \cdot \alpha_1 \cdot F_1 / a)^3)} \quad (2.31)$$

$$M = Q \cdot \mu \cdot \sqrt[4]{(E I) / (64 U)} \quad (2.32)$$

Pela NBR 12206 (33), os valores de U a serem empregados variam entre 70 e 90 kgf/cm² para espaçamento entre dormentes de 0,55 e 0,45 m.

2.9 Módulo resistente do trilho

O módulo resistente à flexão ou momento resistente de uma seção (W , em cm³) se refere ao eixo baricêntrico horizontal. É definido como a relação entre o momento de inércia da seção (I , em cm⁴) e a distância à fibra extrema (a_1 , em cm), conforme equação 2.33 (34).

$$W = I/a_1 \quad (2.33)$$

A relação I/a_1 depende exclusivamente da geometria da seção transversal, conforme a figura 2.12. O momento de inércia e o módulo resistente de um trilho novo são geralmente fornecidos pelos catálogos dos fabricantes.

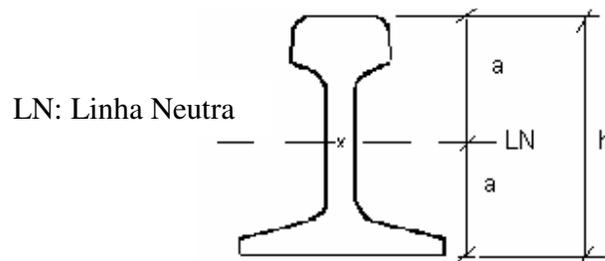


Figura 2.12 - Geometria da seção transversal do trilho

A seção do trilho apresenta momentos resistentes para o patim e para o boleto. O momento resistente do patim (W_p) é dado pela relação entre o momento de inércia da seção e a distância da linha neutra à extremidade do patim (a_1 inferior), enquanto o momento resistente do boleto (W_b) é dado pela relação entre o momento de inércia da seção e a distância da linha neutra à extremidade do boleto (a_1 superior).

Quando há desgaste do boleto, ou seja, perda de massa, o momento de inércia da seção diminui e a linha neutra tende a se deslocar para baixo, portanto a distância a_1 inferior tende a ficar menor e conseqüentemente o momento resistente do patim tende a ser menor que o do trilho novo. Já o valor de a_1 superior pode diminuir ou aumentar, em função de como ocorreu o desgaste no boleto, dependendo da posição da linha neutra, e é medido no eixo da seção. Mesmo quando a_1 superior aumenta em relação ao trilho novo, a tendência é que o momento resistente do boleto seja menor que o do trilho novo, uma vez que o momento de inércia é menor em função da grandeza das variáveis.

O momento de inércia de um trilho desgastado pode ser calculado segundo o teorema dos eixos paralelos, da Resistência dos Materiais, dado pela equação 2.34 e pela figura 2.13, dividindo-se a área da seção transversal em figuras com momentos de inércia conhecidos (35).

$$I_x = \bar{I}_x + A \cdot d^2 \quad (2.34)$$

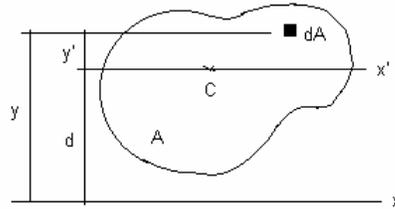


Figura 2.13 - Momento de inércia

Para Brina (2), o momento de inércia e o módulo resistente podem ser calculados de forma aproximada pelas equações 2.35 e 2.36, respectivamente.

$$I = 0,13. S. h^2 \quad (2.35)$$

$$W = 0,25 \text{ a } 0,27. S. h \quad (2.36)$$

A área da seção transversal do trilho é representada por S , em cm^4 , e h sua altura, em cm .

2.10 Escolha do perfil do trilho

A escolha do perfil do trilho é feita a partir da verificação da tensão provocada pelo momento máximo em relação à tensão admissível para trilhos, conforme a expressão 2.37.

$$\sigma = M/W \leq \sigma_{adm} \quad (2.37)$$

Sendo M o momento máximo em kg.cm , W o módulo resistente em cm^3 , σ a tensão atuante em kg/cm^2 e σ_{adm} a tensão admissível da linha em kg/cm^2 .

As tensões admissíveis pela Deutsche Bundesbahn – Rede Ferroviária Alemã (D.B.), segundo Schramm (6), são de 1.500 kgf/cm², para linhas de primeira categoria, 1.600 kgf/cm², para linhas de segunda categoria, com trilhos pesados, 1.800 kgf/cm², para linhas de segunda categoria, com trilhos leves e 2.000 kgf/cm², para linhas de terceira categoria e linhas auxiliares.

Normalmente, as linhas de primeira categoria têm tráfego mais pesado e intenso, o que resulta num mais significativo desgaste dos elementos que compõem a superestrutura.

Para Brina (2), o valor da tensão admissível (σ_{adm}) deve ser fixado em 1.500 kgf/cm², valor que considera a imprecisão do cálculo dos momentos fletores e as sobrecargas a que o trilho pode estar sujeito, e os desgastes decorrentes que diminuem o momento de inércia.

Com o desgaste do trilho, o momento resistente diminui e, como é inversamente proporcional a tensão, esta, conseqüentemente, aumenta.

2.11 Contato roda-trilho

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 (36), 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.

No contato entre dois sólidos esféricos, elásticos e ideais não há pressão exercida entre si, o contato entre ambos se resume a um ponto. Quando pressionados um contra o outro, a região

de contato toma forma elíptica. A tensão máxima de compressão ocorre na parte central da elipse e sua intensidade se calcula segundo a equação de Hertz (37).

Nas ferrovias, segundo Rives; Pita e Puente (1), 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 (ver figura 2.14).

A tensão de compressão máxima na superfície de contato (σ_1), segundo Hertz é calculada pela equação 2.38 apresentada por Schramm (6), 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.

$$\sigma_1 = 178. \left(\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right)^2 \cdot Q \right)^{1/3} \quad (2.38)$$

A área de contato é definida de forma aproximada, ainda segundo Schramm (6), pela equação 2.39.

$$f_1 = (2.Q) / \sigma_1 \quad (2.39)$$

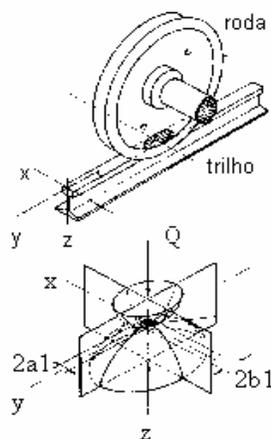


Figura 2.14 - Superfície de contato roda-trilho

O estado de tensões no boleto do trilho, para Esveld (38), pode ser aproximado através da teoria do semi-espaço de Boussinesq. Experimentações para os casos em que a teoria da elasticidade não é aplicável têm demonstrado que a tensão máxima de cisalhamento (τ) pode ser calculada pela expressão 2.40.

$$\tau = 412 \sqrt{Q/r} \quad (2.40)$$

Este modelo pode ser usado onde não haja desgaste côncavo pronunciado das rodas.

Segundo Barbosa (39), a segurança do veículo está ligada diretamente ao relacionamento deste com a via.

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 2.15 (40).

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 (38).

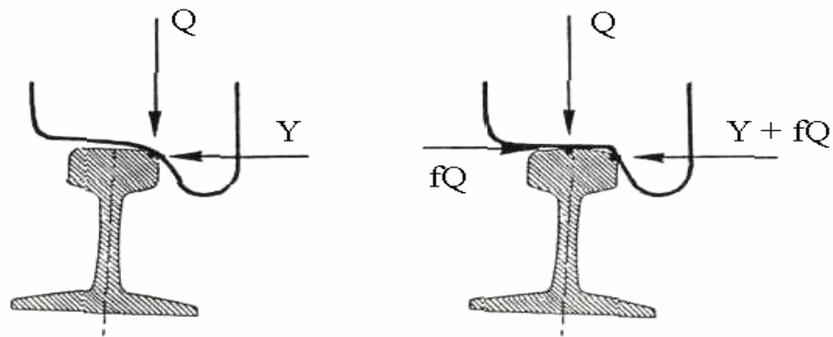


Figura 2.15 - Contato de 1 ou 2 pontos entre o friso e a roda – Fonte: Esveld (38)

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 (9).

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 (7).

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 (V_2), igual a Q na figura 2.16, e pela força lateral (L_1), igual a Y na figura 2.16 (7).

Para Barbosa (41), a força vertical (V_2) 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 (L_1). A relação entre estes esforços (L_1/V_2) determina a tendência para a roda descarrilar. É, portanto, um indicador de segurança da via.

Segundo Junior e Rodrigues (7), 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 (42), o ângulo da face ativa do trilho novo (β) (figura 2.16) 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 2.17) 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 (38) o ângulo de desgaste é limitado a 32° para prevenir a subida da roda no trilho.

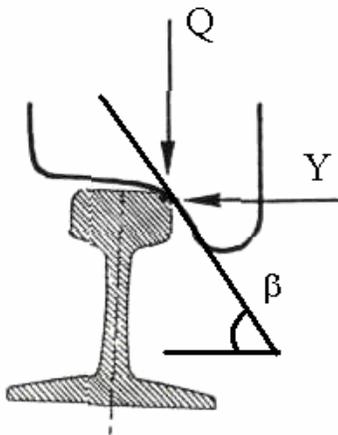


Figura 2.16 - Ângulo trilho novo

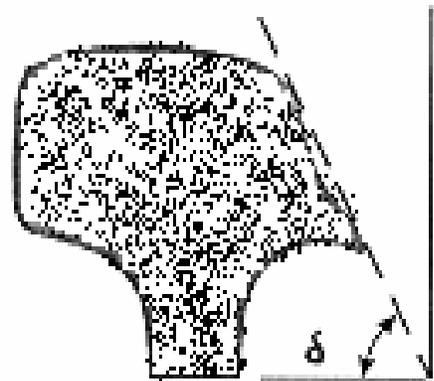


Figura 2.17 - Ângulo trilho desgastado

Ainda para Magalhães (42), 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 2.18, 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 L_1/V_2 .

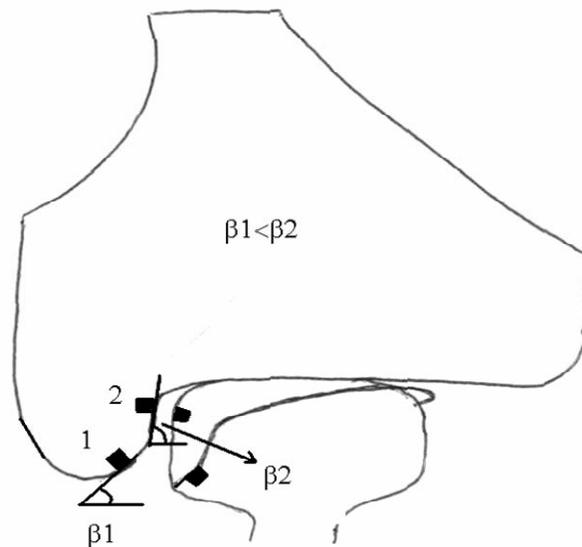


Figura 2.18 – Roda nova e trilho usado - Fonte: (41)

2.12 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado um cenário geral da via férrea, contendo uma descrição de seus componentes básicos. Foi definido o tipo de perfil mais utilizado atualmente nas ferrovias, o tipo Vignole, que será utilizado neste estudo.

Foi levantado o limite de uso do trilho, em relação ao desgaste em área do boleto, que será o objeto de estudo deste trabalho. O valor estabelecido e aceito atualmente é de 25% de perda da área do boleto.

Além disso, foram expostos os limites de desgastes definidos por diversos autores, que serão estudados adiante. Alguns definem como limite o desgaste horizontal, outros o desgaste vertical, ou a combinação dos dois e, ainda, o desgaste definido por um determinado ângulo.

Estes valores serão simulados procurando-se estabelecer alguma relação entre estes limites e o limite de 25% de perda em área do boleto.

Foi relatado que já se conseguiram alcançar valores-limites de desgaste de 35 a 40% de perda em área do boleto, com medidas específicas desenvolvidas pela Canadian Pacific Railway (CPR). Estes programas não foram implantados no Brasil e, portanto, considerar limites de desgaste superiores a 25% de perda em área do boleto não corresponde à realidade brasileira, visto que ainda não existem linhas onde estratégias estejam sendo tomadas com a finalidade de se aumentar o limite de desgaste do trilho.

Foi determinado o valor da tensão admissível que, segundo Brina (2), deve ser fixado em 1.500 kgf/cm^2 , valor que considera a imprecisão do cálculo dos momentos fletores e as sobrecargas a que o trilho pode estar sujeito, e os desgastes que diminuem o momento de inércia.

As metodologias de dimensionamento dos trilhos, relatadas anteriormente, sendo inúmeras as variáveis envolvidas, já foram definidas, assim como apresentados seus intervalos de valores normalizados. A metodologia mais empregada refere-se ao método de Zimmermann.

O contato roda-trilho foi abordado em seus aspectos gerais. Definiu-se que o ângulo de desgaste máximo, para que não ocorra subida da roda no trilho, é de 32° .

Buscaram-se apresentar os conceitos gerais e mais relevantes, essenciais para o estudo a ser desenvolvido nesta dissertação.

3 DEFEITOS E DESGASTES

3.1 Introdução

O contato entre a roda e o trilho é um contato de aço com aço. A intensidade das cargas que atuam na via numa reduzida área de contato, onde ocorre o contato roda-trilho, faz com que essas tensões sejam, em geral, bastante elevadas. Geralmente, segundo Magalhães (42), a tensão de contato supera o limite de escoamento do aço padrão. Como o limite de escoamento do aço é praticamente igual ao limite de esmagamento, a roda e o trilho se deformam, aparentando se encontrarem em estado plástico.

Ainda para Magalhães (42), não ocorre ruína em um dos elementos porque a deformação plástica depende do tempo de aplicação da carga e também porque as superfícies se tornam mais duras e o seu limite de escoamento aumenta após um certo volume de tráfego.

O desenvolvimento de um contato otimizado roda-trilho permite o controle das tensões de contato e das forças de guiagem, como o microescorregamento das rodas, explanado no item 2.2. Estas tensões de contato governam a fadiga e provocam desgaste, pois estabelecem as forças laterais e longitudinais, além de contribuírem para a formação de corrugação e do ruído (36).

Com a instalação das deformações plásticas e defeitos de fadiga, estejam eles na roda, no trilho ou em ambos, a perda de material na superfície de contato costuma ser representativa, submetendo equipamento e via a fortes vibrações e impactos. Os reflexos serão amplos, daí a importância do conhecimento dos limites de resistência disponíveis (17).

3.2 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 (Rail Contact Fatigue - RCF) 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*, 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.

Até recentemente, a fadiga de superfície do trilho não foi considerada como um sério problema em linhas convencionais européias (44). Na Europa a maioria das linhas ferroviárias tem tráfego misto, com trens de passageiros, de alta velocidade e trens de carga de, no máximo, 22,5 toneladas por eixo. Não há, com poucas exceções, ferrovias do tipo *heavy haul*. A maior preocupação nestas linhas era com a vibração e os níveis de ruído. Hoje, entretanto, defeitos do tipo de fadiga por contato de roda recebem uma maior atenção, pois estão sendo detectados freqüentemente em linhas de alta velocidade como consequência das tensões internas decorrentes do contato roda-trilho.

Segundo Hiensch e Watson (45), em 1999, o custo total anual do problema de fadiga por contato de roda foi estimado pelo European Rail Research Institute (ERRI) em 300 milhões de euros. Nos últimos anos, entretanto, os custos com este problema tiveram aumento significativo. Cerca de 20.000 seções de trilho foram removidas em toda Europa para prevenir falhas de fadiga, sendo que 30% delas evidenciaram o problema.

Para Grassie (46), os defeitos de fadiga por contato de rolagem incluem quatro tipos: *squats*, *head checks*, *tache ovals* e *shells*.

Os defeitos dos tipos *squats* e *head checks* têm início na superfície do trilho, enquanto que os dos tipos *tache ovals* e *shells* se iniciam na subsuperfície (17). Para reduzir a prevalência de *shells* e *tache ovals* têm sido desenvolvidos aços e técnicas de soldagem. Para mitigar os problemas de *squats* e *head checking* o esmerilamento é a principal medida (45).

A indústria do aço, segundo Korpanec e Towpic (47), tem desenvolvido métodos para melhorar a pureza dos aços para trilho, usando alumínio como desoxidante e eliminando gases por vácuo. Também têm-se desenvolvido técnicas de endurecimento do boleto, procurando minimizar os problemas que causam os defeitos de contato de rodagem.

O tratamento principal para os RCF tem sido regularmente o esmerilamento do trilho. A base deste tratamento é que o esmerilamento pode ser usado seletivamente, objetivando aumentar artificialmente a taxa de desgaste. O esmerilamento é usado para remover fraturas de superfície quando elas têm fração de 1 mm de profundidade, antes que se propaguem pelo trilho. Este processo se torna uma ferramenta de manutenção preventiva do trilho e não somente um meio de correção para os danos constatados (48).

Conforme Cannon e Pradier (17), o European Rail Research Institute (ERRI) reconheceu a deficiência na compreensão de soluções nos mecanismos que geram fadiga por contato de rodagem, e somente a partir de 1987 passou a desenvolver programas específicos para o entendimento destas questões.

Na Holanda, a extensão dos defeitos tipo RCF é monitorada através de um programa denominado ProRail. Este programa busca combater os defeitos através do desenvolvimento de novos tipos de trilhos e perfis de rodas (49). As inspeções determinam a quantidade, localização precisa e gravidade dos *head checks* e *squats*, quantificando a extensão da via afetada por estes defeitos ou o momento de troca. Estima-se que, com uma política de prevenção, utilizando trilhos especiais, reperfilamento do trilho e ciclos adequados de esmerilamento pode-se reduzir em até 60% os custos associados a estes defeitos.

Defeitos do tipo *squats* causam fraturas transversais no trilho (figuras 3.1 e 3.2) e ocorrem no boleto do trilho, em linhas de alta velocidade (17). Tais defeitos são classificados em leve, moderado e pesado, conforme a ocorrência de fraturas (figura 3.3). Em abril de 2003 foram levantados dados que mostraram que numa rede holandesa de 6.690 km de via, 1.072,6 km apresentaram esses diferentes tipos de defeitos, sendo 74,8 km na forma pesado (49).



Figura 3.1 – *Squats* – Fonte: (50)

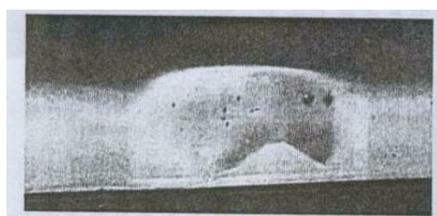


Figura 3.2 - *Squats* – Fonte: (49)

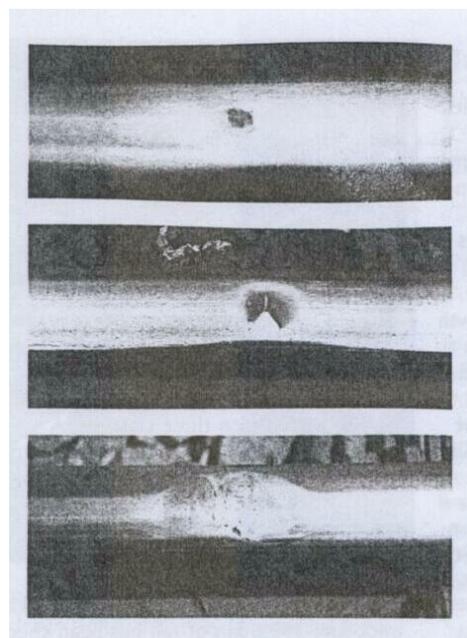


Figura 3.3 – *Squats* leve (acima), moderado (centro), pesado (abaixo) – Fonte: (49)

Conforme Grassie (48), foi relatado em 1992 pela Société Nationale de Chemin de Fer (SNCF) que 20% das rupturas do trilho ocorreram por *squats*. Problemas semelhantes foram responsáveis pela razão principal na remoção prematura de trilhos em linhas japonesas. No início de 1982, também por defeitos de fadiga iniciados na superfície, foram creditados 12% nos custos de recolocação do trilho nas estradas do Canadá (Canadian Pacific Railways - CPR), apesar das medidas tomadas pela CPR para tratar essa questão.

Os *head checks* (figuras 3.4 e 3.5) são um defeito de trilho que consistem no trincamento do boleto em um ângulo de 45° com o eixo do perfil metálico, de acordo com definição de Branco (51). Ocorrem principalmente no canto da bitola nos trilhos externos em curvas de

grandes raios, mas também ocorrem na fila interna dos trilhos e em tangentes. As trincas eventualmente podem se juntar, gerando a perda de material conhecida como *floculação* (47).

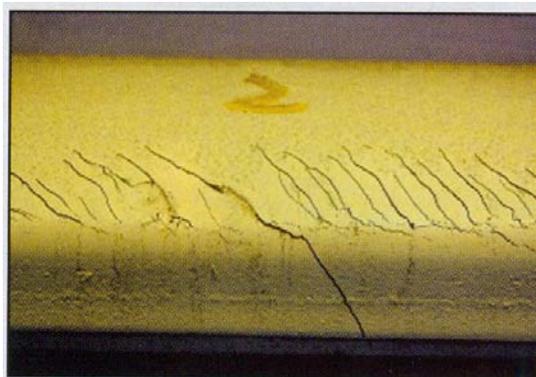


Figura 3.4 – *Head checks* – Fonte: (50)

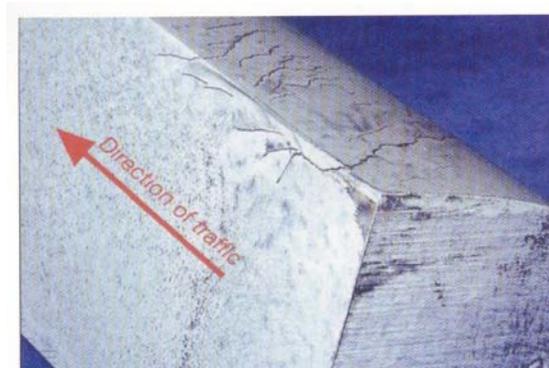


Figura 3.5 – *Head checks* – Fonte: (52)

Na *floculação*, lamelas de metal se soltam da superfície de rolamento (figura 3.6), sendo que a profundidade do defeito pode atingir vários milímetros, causando uma gradual depressão nessa superfície (53).



Figura 3.6 – *Floculação* – Fonte: (44)

Os defeitos tipo *head checks* são classificados, conforme a gravidade, em leve, moderado, pesado ou severo (figura 3.7).

Dados produzidos em abril de 2003 revelaram a escala do problema na Holanda. Segundo Smulders (49), numa rede com 6.690 km de via desse país, 399,6 km apresentavam *head checks*, sendo que 25 km apresentavam o defeito do tipo severo.

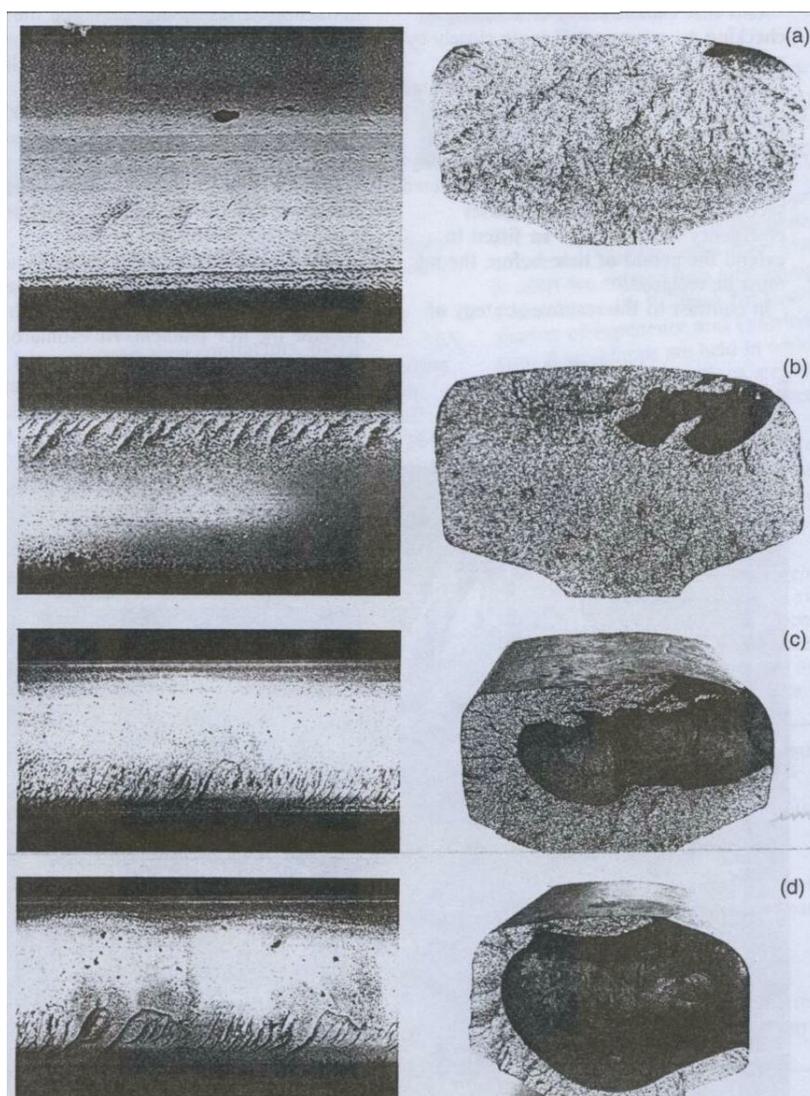


Figura 3.7 – *Head checks* leve (a), moderado (b), pesado (c) e severo (d) – Fonte: (49)

Os defeitos do tipo *tache ovals* (figuras 3.8, 3.9 e 3.12), para Grassie (46), estão associados com um deficiente processo de soldagem. Desenvolvem, por isso, cavidades de 10 a 15 mm longitudinais no boleto do trilho, causadas pela presença de hidrogênio, onde se evidenciam defeitos chamados *shatter cracks*, podendo ainda ocorrer em outras partes do trilho.

Os defeitos chamados *shatter cracks*, segundo Branco (51), são aqueles caracterizados pela aparição de inúmeras trincas após exposição a intenso calor, seja durante processo de corte ou de patinação das rodas do veículo.

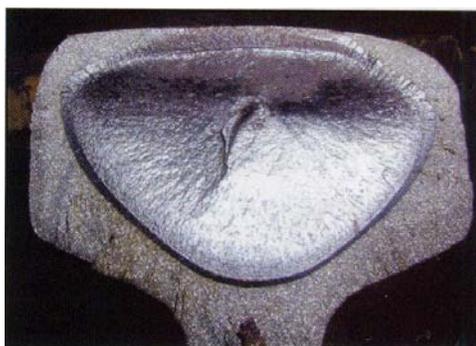


Figura 3.8 – *Tache ovals* – Fonte: (50)

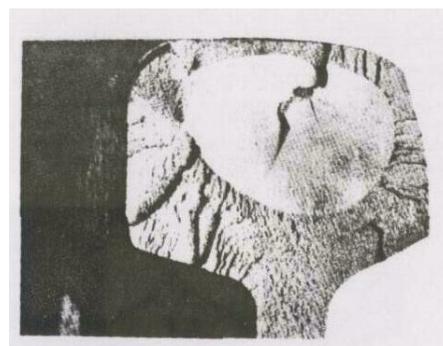


Figura 3.9 – *Tache ovals* – Fonte: (38)

Os *shells* (lascamentos) são defeitos no trilho causados pelo tráfego, caracterizam-se pela escamação ou descascamento do boleto (figuras 3.10 e 3.12), ou do canto da bitola (figura 3.11) (51). Podem se dar combinados a um ligeiro esmagamento do boleto na região da ponta do trilho, acompanhados de saliências de pequena dimensão correspondentes à expulsão do metal.

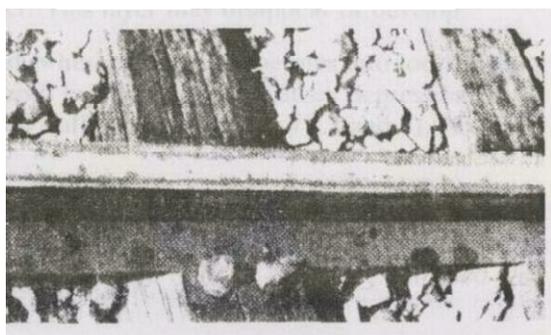


Figura 3.10 – *Shells* no boleto – Fonte: (38)

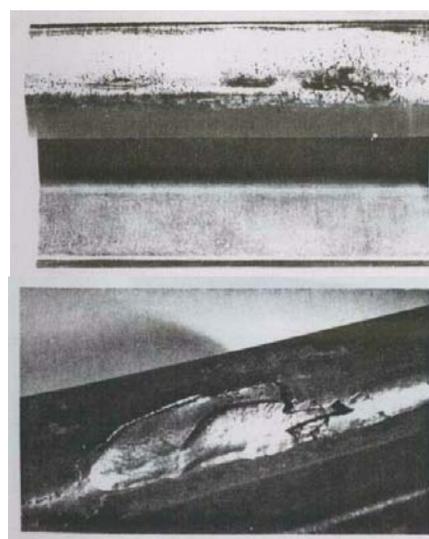


Figura 3.11 – *Shells* no canto da bitola –
Fonte: (38)

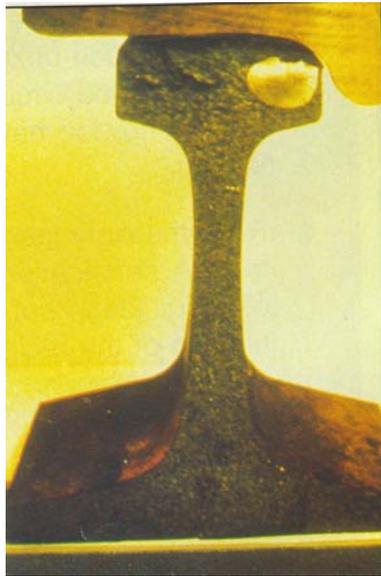


Figura 3.12 – *Shells* e tache ovales – Fonte: (46)

Outros defeitos originados em serviço são deformações nas pontas, desgastes por ação química e autotêmpera superficial, definidos por Brina (2).

Essas deformações nas pontas do trilho ocorrem devido aos choques e flexões nas juntas, quando os dormentes estão desnivelados. Podem ocorrer fadiga do metal e fraturas, caso a manutenção não seja feita para nivelar os dormentes.

O aço da alma e do patim do trilho pode sofrer desgaste por ação química quando numa via são transportadas mercadorias que favoreçam esta condição, tais como enxofre, sal, salitre, entre outros.

A autotêmpera superficial é um fenômeno que produz pequenas fissuras superficiais no trilho, as quais podem se propagar pelo seu interior. É provocada pela patinação das rodas das locomotivas que aquecem a camada superficial do metal e esta, ao se esfriar rapidamente em contato com o ar, cria uma têmpera superficial.

A NBR 7640 (54) define os tipos de defeitos de trilho que podem ocorrer na via férrea.

O trilho ainda pode apresentar outros defeitos decorrentes do seu processo de fabricação, os quais não serão aqui abordados por extrapolarem o escopo deste estudo, nada impedindo que o tema seja objeto de futuras pesquisas.

3.3 Desgaste

O desgaste dos trilhos tem sido considerado como fator fundamental na economia ferroviária, desde os primeiros anos do século XIX (1). 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.

Quando há desgaste côncavo ou sulco nas rodas, o apoio passa a ocorrer no friso falso e as tensões de contato aumentam, principalmente em ferrovias com elevada carga por eixo. Este tipo de ocorrência é denominado por Magalhães (37) como regime de *stress*. O regime de desgaste está associado a traçados sinuosos, que geram muitos esforços laterais e amplos ângulos de ataque, resultando num contato abrasivo do friso com o boleto, até tornarem-se ambos muito finos. Quando o traçado é predominantemente reto e o veículo se mantém centrado na via, gerando o aprisionamento lateral das rodas, têm-se o regime de fadiga.

Continuando a observação de Magalhães (37), o regime de desgaste é o que mais ocorre nas ferrovias brasileiras, como consequência do característico traçado sinuoso das vias.

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 descarburada 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 (1).

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 (2), existem três processos para determinação do perfil desgastado. O primeiro é através da utilização do perfilógrafo, 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.

Para os levantamentos do desgaste dos trilhos considerados neste estudo foi utilizado um tipo de perfilógrafo composto de um sistema portátil de medição do perfil. O aparelho de propriedade da MRS Logística é o *Laserail*®, modelo EZ-2 de fabricação da ImageMap, mostrado na figura 3.13.



Figura 3.13 – *Laserail*

O *Laserail*® é um aparelho integrado a um computador, que através de um sistema a

* O *Laserail*® é marca registrada da empresa americana ImageMap.

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 (55). Seu programa gera um arquivo de desenho no formato PDF (Portable Document Format). Um exemplo desse tipo de desenho é apresentado no item 4.3.

Segundo Rives; Pita e Puente (1), 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 (1).

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 (1).

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 (1).

O desgaste ondulatorio do trilho, ou corrugação, incluem-se em uma família de fenômenos que constituem um problema para muitas ferrovias (figura 3.14).

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 (56).

O desgaste ondulatório 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 (57).



Figura 3.14 – Corrugação claramente visível – Fonte: (56)

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.

Esses custos de manutenção afetam muito a exploração ferroviária e, segundo Panades (57), a Deutsche Bundesbahn - DB (companhia ferroviária alemã) gastou 18 milhões de marcos em 1983 com o esmerilamento 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 (37), 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.

Corrugações, um dos principais tipos de desgastes ondulatórios, cujas implicações econômicas se mostram bastante significativas, são áreas na superfície de rolamento do trilho com ondulações brilhantes e escuras. São classificadas fundamentalmente pelo comprimento longitudinal de onda e pela amplitude das cristas e cavidades que dependem do tipo de ondulação (57).

Há, no entanto, divergências entre os autores a respeito da classificação baseada nos comprimentos de onda. Segundo Esveld (38), a corrugação pode ser classificada em ondas curtas (figura 3.15) ou longas (figura 3.16). As ondas curtas apresentam comprimento de onda de 3 a 8 cm. As ondas longas, de 8 a 30 cm.

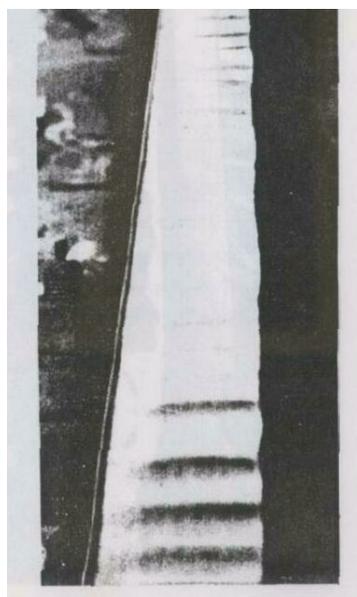


Figura 3.15 – Corrugação de onda curta –
Fonte: (38)

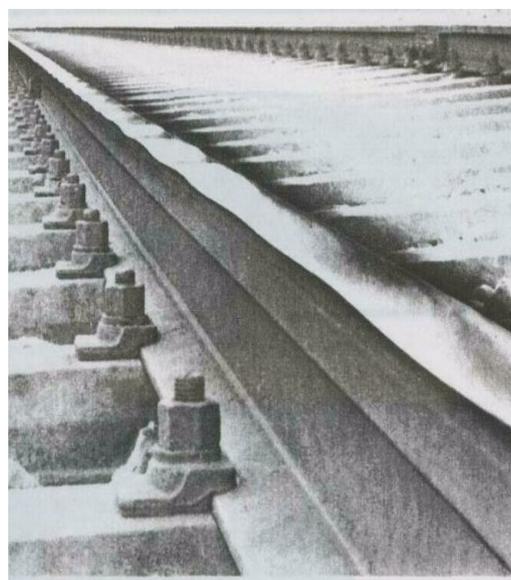


Figura 3.16 – Corrugação de onda longa –
Fonte: (38)

Para Birmann (58), as ondas curtas variam de 8 a 15 cm de comprimento e de 0,2 a 1,2 mm de profundidade. As ondas longas variam de 100 a 210 cm de comprimento e apresentam profundidade maior que 0,5 mm e causam problemas para velocidades acima de 140 km/h.

Conforme Kaess (59), corrugações têm comprimentos de onda de 3 a 6 cm e amplitudes maiores que 4 mm. Quando os comprimentos de onda variam de 10 a 300 cm e têm amplitudes maiores que 2 mm, passam a ser chamadas ondulações.

Rives; Pita e Puente (1) definem que as ondas características da corrugação têm longitude entre 3 e 8 cm e amplitude até 4 mm. As ondas longas têm comprimento variando de 10 a 200 cm.

Áreas polidas com distância entre si regulares de 4 a 5 cm e amplitude de onda de 0,1 a 0,4 mm são definidas por Schramm (6) como corrugação. São consideradas ondulações, quando as distâncias entre os ressaltos das corrugações passam a ter de 8 a 40 cm.

Guimarães (32) classifica como corrugação quando o comprimento de onda varia de 3 a 10 cm.

Para Magalhães (37), a corrugação se classifica em dois tipos: com ondulações curtas, duras e brilhantes, com afastamento entre 3 e 9 cm e de pequena amplitude e com ondulações longas e visualmente menos perceptíveis, com afastamento entre cristas de 10 a 200 cm e amplitude maior.

Segundo a RFFSA (53), a corrugação de ondas curtas tem comprimento de ondas variando de 3 a 8 cm e a de ondas longas, de 8 a 30 cm.

A classificação simples da corrugação, como comprimento de onda longo ou curto, não é efetiva, visto que muitos tipos de corrugação têm similar comprimento de onda, devido à variedade de classificações existentes.

Grassie e Kalousek (56) sugeriram uma classificação baseada no mecanismo dinâmico que fixa o comprimento de onda da corrugação, chamado mecanismo de fixação do comprimento de onda, e o mecanismo que causa a ondulação como resultado das cargas dinâmicas, ou mecanismos de danos. Esta classificação auxilia no desenvolvimento do tratamento a ser utilizado, apesar de já terem sido identificados outros tipos de corrugação desde então.

Os chamados mecanismos de dano do tipo escoamento plástico, flexão plástica e fadiga de contato estão associados a um mecanismo de comprimento de onda extremamente destrutiva para a via e para os veículos. A grande diversidade da corrugação está associada ao desgaste, o quarto mecanismo de dano.

Ainda segundo Grassie e Kalousek (56), a corrugação por escoamento plástico e fadiga de contato só ocorre em vias de tráfego pesado. A corrugação originada pela flexão plástica ocorre em poucas ferrovias onde há trilho leve e altas cargas dinâmicas. Já a corrugação resultante de desgaste é um problema em quase todos os tipos de ferrovias.

Conforme a bibliografia consultada, ainda não existe uma definição de corrugação e não se sabe a origem ou causas desse processo, apesar dos muitos estudos e investigações feitas ao longo de décadas.

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 (57).

Para Brina (2), 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 (1).

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*®* utilizado pela MRS Logística, pode ser visto na figura 3.17.



Figura 3.17 – Carro-controle

A perfeita manutenção da superfície de rodagem é muito importante para evitar o ruído, consequência da corrugação. Rhodes e Shield (60) afirmam que os níveis de ruído crescem significativamente em trilhos corrugados. Logo, prevenir a corrugação garante uma adequada

* *Track Evaluation Vehicle*® é marca registrada.

resiliência do trilho. Em trilhos com a superfície corrugada, segundo Birmann (58), 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 esmerilamento 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 (61).

Outro importante uso do esmerilamento, caracterizado por Grassie e Kalousek (56), 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 RCF e o desgaste roda-trilho e melhorando essa interação, podem-se estender os intervalos de esmerilamento e também reduzir a taxa de remoção de trilho, assim prolongando a sua vida útil, reduzindo os gastos com manutenção (62).

O benefício econômico aumenta quando os procedimentos de esmerilamento são bem planejados, o que inclui desenhar apropriadamente o perfil, escolher o adequado procedimento de esmerilamento e monitorar a interação roda-trilho. Segundo Wu (62), os custos com esmerilamento nas *heavy haul* norte-americanas podem alcançar 20.000 dólares por dia.

Ao longo dos anos, três tipos de esmerilamento foram desenvolvidos: corretivo, de manutenção e preventivo (63).

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

A técnica de esmerilamento 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 esmerilamento preventivo, que é feito com um passe do trem esmerilador para se remover somente uma camada de material, a fim de se controlar a fadiga de superfície. Esse esmerilamento 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.

O desgaste ondulatório engloba um conjunto de fenômenos de origem pouco conhecida. Apesar de tratado e eliminado, esse fenômeno pode voltar a ocorrer no trilho e por isso seu esmerilamento preventivo se mostra como o método mais eficaz para minimizar este problema.

Segundo Kalousek e Magel (63), várias ferrovias norte-americanas têm utilizado o esmerilamento 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 esmerilamento, que incluem o não-esmerilamento, o esmerilamento corretivo e o esmerilamento preventivo, este introduzido a partir de 1993. Conforme Sroba, Magel e Prah (52), 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-esmerilamento, e de 68 milhões de dólares com a técnica do esmerilamento corretivo, resultando numa economia de 13 milhões de dólares por ano com a substituição de trilhos, enquanto o custo anual com o esmerilamento corretivo foi em torno de 8 milhões. Já o custo com a substituição de trilhos empregando técnicas de esmerilamento 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-esmerilamento. Como o custo com o esmerilamento 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.

A holandesa Netherlands Railways (NS) também adotara o esmerilamento preventivo do trilho, baseando-se em mais de vinte e cinco anos de experiência (64). A partir de 1970, começou a ser praticado o esmerilamento preventivo na NS, até então a corrugação raramente ocorrera nestes trilhos. No começo dos anos 80 somente 1% das linhas principais da NS foram afetadas pela corrugação contra 10% em outras linhas principais européias. Após investigação, concluiu-se que a baixa proporção da corrugação era resultado da política de esmerilamento preventivo adotada em 1970. Esta experiência mostrou que houve um acréscimo de 25% na vida útil dos trilhos. Entre 1990 e 1997, houve uma reorganização na administração da linha NS e o esmerilamento preventivo deixou de ser realizado. Ao fim deste período, tornou-se evidente que a corrugação do trilho estava se propagando, comprometendo aproximadamente 15% da linha. Baseado na experiência adquirida entre os anos 80 e 90, o esmerilamento preventivo foi reintroduzido na NS.

O único trem esmerilador no Brasil pertence à MRS Logística (figura 3.18), realizando manutenção preventiva em suas linhas, de acordo com a densidade de tráfego de cada uma delas. Segundo dados da MRS, desde que o trem esmerilador entrou em operação, a vida útil dos trilhos foi duplicada e nos últimos quatro anos o volume de aquisição foi de 46 mil toneladas de trilhos, enquanto o projetado era de 77 mil (65).

Conforme Stanford e Kalousek (66), o National Research Council of Canada's (NRC) Center for Surface Transportation Technology desenvolveu um método de esmerilamento 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 esmerilamento 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 (38) define dois métodos para aplicar o esmerilamento 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 esmerilamento, como a GWM 220 e a Speno (figura 3.19).



Figura 3.18 – Trem esmerilador MRS

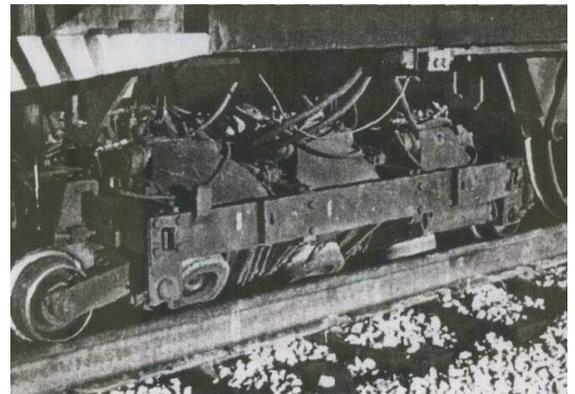


Figura 3.19 – Trem esmerilador Speno

Um procedimento adequado a trilhos por onde trafegam veículos de cargas pesadas é o esmerilamento 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 (38).

Além das ferrovias citadas, Canadian Pacific Railway e Burlington Northern and Santa Fé, outras que empregam as melhores técnicas de esmerilamento 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 sul-africana Spoornet, e desde 2002 a Network Rail do Reino Unido (52).

De acordo com Tuzik (61), a produção de aço de alta dureza e alta qualidade, a lubrificação efetiva e o esmerilamento 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 Transportation Technology Center Inc. (TTCI) tem demonstrado um papel fundamental nas pesquisas com aço, visando aumentar a vida útil dos trilhos (55). Constatou-se que o aço de alta dureza é altamente resistente aos defeitos tipo RCF e, mesmo sendo menos resistente ao desgaste, requer um menor esmerilamento, se comparado aos feitos com outros tipos de aço, ampliando-se sua vida útil.

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 esmerilamento é ainda mais eficiente para controlar estes defeitos (61).

As forças da estabilidade e de guia, como já citadas, exercem influência considerável no desgaste da roda e do trilho. Os perfis otimizados deles podem ajudar a controlar as forças laterais, reduzindo o desgaste nessa interação.

Para Magel (36), uma relação otimizada na interação pode controlar os defeitos de fadiga, a corrugação, o ruído e o desgaste excessivo da roda e do trilho.

Um exemplo de otimização ocorreu em fevereiro e março de 2004, quando foi conduzida uma operação de esmerilamento na linha de alta velocidade, na via Northeast Corridor entre Washington e Boston. O objetivo desse programa era remover pequenas fraturas de fadiga que se desenvolveram entre ciclos normais de esmerilamento e também aplicar os perfis do trilho que promoveriam uma melhor interação roda-trilho. A linha mantém até hoje esmerilamento regular, inibindo as falhas por fadiga do trilho (67).

O National Research Council of Canada projetou perfis específicos que reduzem o desgaste pelo controle da área de contato roda-trilho, usando um software próprio e considerando os perfis das rodas desgastadas, típicas da linha. Combinando com esmerilamento regular, estes

perfis prolongam a vida útil do trilho e das rodas. Reduzindo o risco de propagação de fraturas na superfície do trilho, a segurança dos trens e dos passageiros se amplia (67).

A fim de medir o sucesso do programa, está sendo monitorado o progresso dos perfis da roda e do trilho. Curvas foram ajustadas monitorando-se a deterioração do perfil, o desenvolvimento das fraturas e os desgastes do trilho. Esta informação será utilizada para otimizar os perfis do trilho e desenvolver estratégias para esmerilamento (67).

3.4 Considerações finais

Neste capítulo apresentaram-se os principais tipos de defeitos que podem ocorrer na via decorrentes do serviço, sua caracterização e as medidas para a minimização dos problemas.

Procurou-se também explicar sobre os desgastes conseqüentes do contato roda-trilho, que resultam na desconfiguração do perfil do trilho.

Mostraram-se, ainda, algumas pesquisas que foram ou estão sendo desenvolvidas a fim de solucionar os problemas especificados.

Como se pôde observar, os defeitos e os desgastes afetam significativamente a economia do sistema ferroviário devido ao elevado custo de substituição dos componentes envolvidos, além de comprometerem a segurança do serviço.

Além disso, enfatiza-se a importância da pesquisa de novos materiais e o uso de perfis otimizados com o objetivo de se prolongar a vida útil do trilho.

É importante destacar, para a estruturação da pesquisa, que programas utilizados em outros países tiveram suas próprias características, onde conseguiram majorar o limite de 25% de

área do boleto para 35 a 40%, como o caso apresentado no item 2.4, da Canadian Pacific Railways. No Brasil, não existe nenhuma linha férrea que adote programa semelhante e por isso não é factível considerar um limite de desgaste maior que 25%. Esta pesquisa, portanto, considerará o limite de 25% como válido para as ferrovias em geral.

4 ESTUDO DO DESGASTE DO TRILHO

4.1 Definição geral do experimento

O contato da roda com o trilho faz com que ambos sofram desgastes. O desgaste no boleto do trilho muda sua geometria e seu perfil, comprometendo o contato roda-trilho e conseqüentemente a segurança do sistema. Admite-se um determinado limite, depois do qual o trilho deve ser substituído, sendo aceitável por convenção até 25% de perda em área do boleto do trilho.

As atividades desenvolvidas neste estudo buscaram encontrar uma justificativa para a adoção deste limite e foram divididas em duas partes. Na primeira, foram analisados os limites de desgaste encontrados na literatura. Já na segunda parte foi elaborado um estudo do desgaste nos trilhos da linha A da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), que usa trilhos do tipo TR-57, dormentes de madeira com espaçamento de 60 centímetros e lastro de pedra britada.

Numa primeira fase de estudo foram simulados os desgastes sofridos pelo trilho TR-57 em função dos limites de desgaste estabelecidos por vários autores e citados no item 2.4. Esses limites são os verticais ou horizontais dimensionados em milímetros de perda do boleto. O perfil do trilho TR-57 foi desenhado utilizando-se do programa de desenho AutoCad e foram feitos cortes no desenho, representando as perdas sofridas pelo trilho até o limite estabelecido em conformidade com cada autor. Calculou-se o quanto esta perda simulada representou em área do boleto e analisaram-se os valores encontrados buscando estabelecer uma relação entre o limite de desgaste definido pelos autores, transformado em porcentagem em área do boleto, e os 25% de perda em área do boleto admitida como limite referencial.

A seguir, um segundo estudo foi realizado em campo. Foram analisados 250 perfis do tipo TR-57 em uso na linha A da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM). O desgaste dos trilhos foi medido através do aparelho denominado Laserail, descrito no item 3.3, que fornece a perda em área do boleto do trilho. O perfil do trilho obtido pelo aparelho em formato PDF foi redesenhado no programa AutoCad, pois este programa de desenho permite que se calculem os momentos de inércia dos perfis desgastados (68). Esses momentos foram então calculados e ajustou-se uma equação que representa a relação entre a perda em área do perfil e o momento de inércia. Considerou-se que esta equação é adequada à realidade ferroviária para o perfil considerado, já que foi obtida a partir de situações de desgaste reais. Partindo da equação encontrada, foram processadas rotinas de cálculo relacionando a perda em área do boleto com as tensões, procurando-se estabelecer uma relação entre a área de desgaste que gerou a tensão e a tensão admissível, verificando se o desgaste total de 25% em área do boleto é um valor adequado à realidade ferroviária.

4.2 O estudo do desgaste na literatura

Os valores adotados como limites de desgaste variam para cada autor, os quais identificam os desgastes verticais ou horizontais. Os desgastes máximos para o trilho TR-57 definidos pelos autores citados no item 2.4 foram simulados através do desenho dos perfis desgastados, utilizando-se do programa AutoCad, e foram calculadas as áreas dos boletos para determinar a porcentagem de perda em área do boleto que estes desgastes representam, procurando encontrar uma relação entre o valor da perda calculado e a perda de 25% estabelecida e aceita no meio ferroviário em geral, como limite de desgaste.

O primeiro autor a ser citado foi Brina (2), que define como 12 milímetros o limite de desgaste vertical para linhas principais e de 15 a 20 milímetros o limite para linhas secundárias, e

fixa, para o desgaste lateral do boleto, um ângulo de desgaste de 32 a 34°, como mostra a figura 2.4 do item 2.4.

O perfil do trilho TR-57 foi desenhado no programa AutoCad e foram feitos cortes neste perfil representando estes limites. A área do boleto foi então calculada e foi determinado quanto estes cortes representaram em porcentagem de perda em área do boleto. Os valores encontrados são apresentados na tabela 4.1. Na figura 4.1 é apresentado o desenho para o corte equivalente aos desgastes vertical de 12 mm e lateral de 34°.

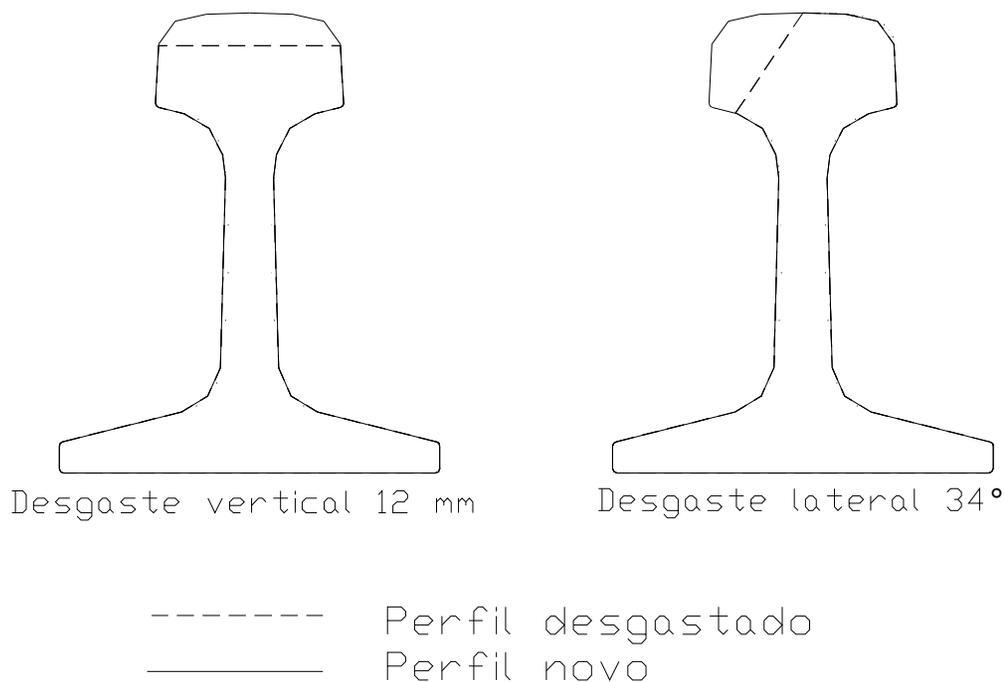


Figura 4.1 - Desenho simulando desgastes

O gráfico que relaciona a perda em área dos boletos com os respectivos momentos de inércia, calculados a partir dos desenhos simulados, é mostrado na figura 4.2. A relação entre estas variáveis é apresentada na equação 4.1, onde pd é a perda em área do boleto e I , o momento de inércia, em cm^4 . O coeficiente de determinação (R^2) desta equação é 0,97, o que significa que 97% da variação do momento de inércia podem ser explicados pela correlação, ou seja, o

coeficiente de determinação é satisfatório, revelando que o modelo se enquadra bem à situação analisada.

$$I = 2862,21 \text{ pd}^3 - 2988,79 \text{ pd}^2 - 1220,15 \text{ pd} + 2730,47 \quad (4.1)$$

Tabela 4.1 – Limites de desgaste

Desgaste vertical (mm)	Desgaste lateral (°)	Área boleto (mm ²)	Perda boleto	I (cm ⁴)
0,00	0	2506,60	0,00	2730,47
10,00	0	1942,84	0,22	2268,16
11,00	0	1876,56	0,25	2214,81
12,00	0	1809,79	0,28	2161,18
15,00	0	1608,85	0,36	2000,35
16,00	0	1541,66	0,38	1946,71
17,00	0	1474,36	0,41	1893,04
18,00	0	1406,95	0,44	1839,33
19,00	0	1339,44	0,47	1785,55
20,00	0	1271,82	0,49	1731,69
0,00	30	1716,86	0,32	2220,35
0,00	32	1749,74	0,30	2239,30
0,00	34	1783,64	0,29	2258,66
0,00	36	1818,11	0,27	2278,30
0,00	38	1853,91	0,26	2298,62
0,00	40	1890,39	0,25	2319,25
2,00	42	1890,00	0,25	2303,21
4,00	44	1869,35	0,25	2268,96
6,00	46	1838,11	0,27	2227,03
8,00	48	1796,00	0,28	2178,98
12,00	34	1386,67	0,45	1879,13
15,00	34	1258,88	0,50	1763,79
20,00	34	1031,35	0,59	1564,03

Pode-se observar pela tabela 4.1 que o limite estabelecido por Brina (2) para o desgaste vertical para linhas principais, que é de 12 milímetros, corresponde a 28% de perda em área do boleto. Este valor está acima do limite de 25%, definido como limite último de desgaste. Conclui-se que a perda é de 36% para o desgaste de 15 milímetros, e de 49%, para o desgaste de 20 milímetros, ou seja, o valor último estabelecido por Brina de desgaste vertical corresponde a 49% de perda em área do boleto, valor muito acima dos 25% convencionados como limite no meio ferroviário.

Para o desgaste lateral, um ângulo de desgaste de 34° corresponde a 29% de perda em área do boleto. Considerando-se que o desgaste vertical e o desgaste lateral ocorram simultaneamente, sendo atingido o limite mínimo de 12 milímetros para o desgaste vertical e 34° para o desgaste lateral, a perda em área do boleto será de 45%, valor muito acima dos 25% de perda.

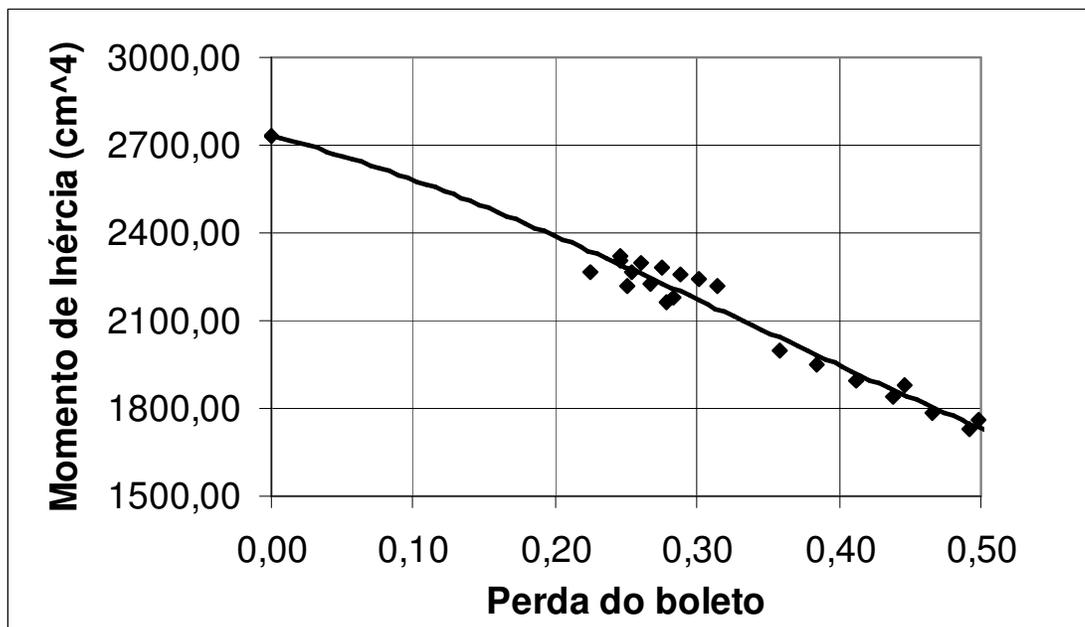


Figura 4.2 – Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia

Conclui-se, portanto, que os limites estabelecidos por Brina (2) não mostram proximidade com o valor de 25% de perda em área do boleto para o trilho TR-57.

Como os valores limites de desgaste de Brina não estão definidos para um tipo específico de trilho, foram testados também os trilhos TR-45, TR-50 e TR-68 buscando-se encontrar uma relação entre os limites estabelecidos e a perda de 25% em área do boleto. Os valores encontrados de perda em área do boleto, a partir da simulação dos desgastes em cada trilho, estão reunidos na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Limites de desgaste

Trilho	Desgaste vertical (mm)	Desgaste lateral (°)	Área boleto (mm ²)	Perda boleto	I (cm ⁴)
TR-45	12,00	0	1366,39	0,34	1150,46
	0,00	34	1431,17	0,30	1267,38
	12,00	34	1036,30	0,50	989,41
TR-50	12,00	0	1738,61	0,29	1548,57
	0,00	34	1741,48	0,29	1656,00
	12,00	34	1332,44	0,46	1334,91
TR-68	12,00	0	2401,09	0,24	3240,55
	0,00	34	2281,32	0,28	3302,75
	12,00	34	1850,89	0,42	2815,61

Testando o mínimo limite de desgaste vertical, observa-se, pela tabela 4.2, que para os trilhos TR-45 e TR-50 a perda em área do boleto corresponde a 34% e 29%, respectivamente. Para o trilho TR-68 este limite corresponde a perda de 24%. Ocorrendo um desgaste vertical maior que 12 milímetros, a perda seria maior que 25%. Analisando o limite de desgaste lateral, a perda em área do boleto é maior que 25% para os três tipos de trilho, sendo de 30%, para o trilho TR-45, 29%, para o trilho TR-50 e 28%, para o TR-68. A ocorrência simultânea dos desgastes vertical e lateral resultará, portanto, em perda maior que 25% de área do boleto.

Pode-se concluir que a única proximidade entre as perdas em área resultantes dos limites estabelecidos por Brina (2) e o valor de 25% que está sendo analisado, ocorre para o desgaste vertical de 12 milímetros para o trilho TR-68, cuja perda corresponde a 24% de área do boleto.

Os limites fixados pela Rede Ferroviária Federal S.A (23 apud 4) foram apresentados na tabela 2.2, no item 2.4. Foram testados os valores de desgaste mostrados na tabela 4.3, através de simulações de cortes no perfil do trilho TR-57 desenhado em AutoCad, conforme exemplo mostrado na figura 4.3.

Tabela 4.3 – Limites de desgaste conforme RFFSA (23 apud 4)

Desgaste vertical (mm)	Desgaste horizontal (mm)	Desgaste máximo total (mm)	Área do boleto (mm ²)	Perda boleto	I (cm ⁴)
0,00	0,00	0,00	2506,60	0,00	2730,47
10,00	0,00	10,00	1942,84	0,22	2268,16
10,00	3,00	11,50	1883,71	0,25	2233,23
10,00	4,00	12,00	1858,58	0,26	2217,92
10,00	5,00	12,50	1832,73	0,27	2202,08
10,00	10,00	15,00	1698,99	0,32	2118,98
0,00	20,00	10,00	1847,72	0,26	2346,68
0,00	10,00	5,00	2216,40	0,12	2572,42
8,00	6,00	11,00	1930,50	0,23	2289,69
8,00	8,00	12,00	1874,50	0,25	2255,83
7,00	10,00	12,00	1872,34	0,25	2268,75
8,00	10,00	13,00	1814,55	0,28	2218,62

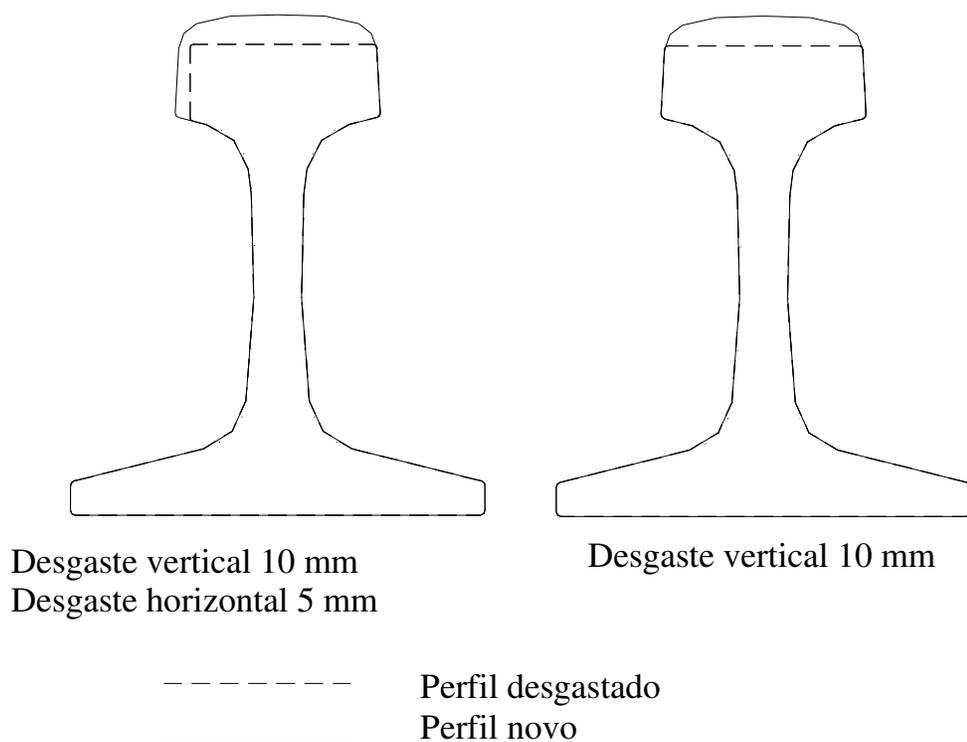


Figura 4.3 - Desenho simulando desgastes verticais e horizontais

O gráfico que relaciona a perda em área dos boletos com os respectivos momentos de inércia, calculados a partir dos desenhos simulados, é mostrado na figura 4.4, e a equação 4.2 mostra a relação entre as variáveis. A variável pd representa a perda em área do boleto e a variável I , o momento de inércia. O coeficiente de determinação (R^2) desta equação é 0,95, o que é bastante satisfatório.

$$I = 16391,78 \text{ pd}^3 - 8872,02 \text{ pd}^2 - 688,65 \text{ pd} + 2730,47 \quad (4.2)$$

Os limites de desgaste estabelecidos para o trilho TR-57 (23 apud 4) são de 10 milímetros para o desgaste vertical e de 10, 12 e 15 milímetros para o desgaste total, dependendo da tonelagem da linha, como já foi mostrado na tabela 2.2 do item 2.4. Baseando-se nestes valores, procedeu-se a simulação e análise dos desgastes.

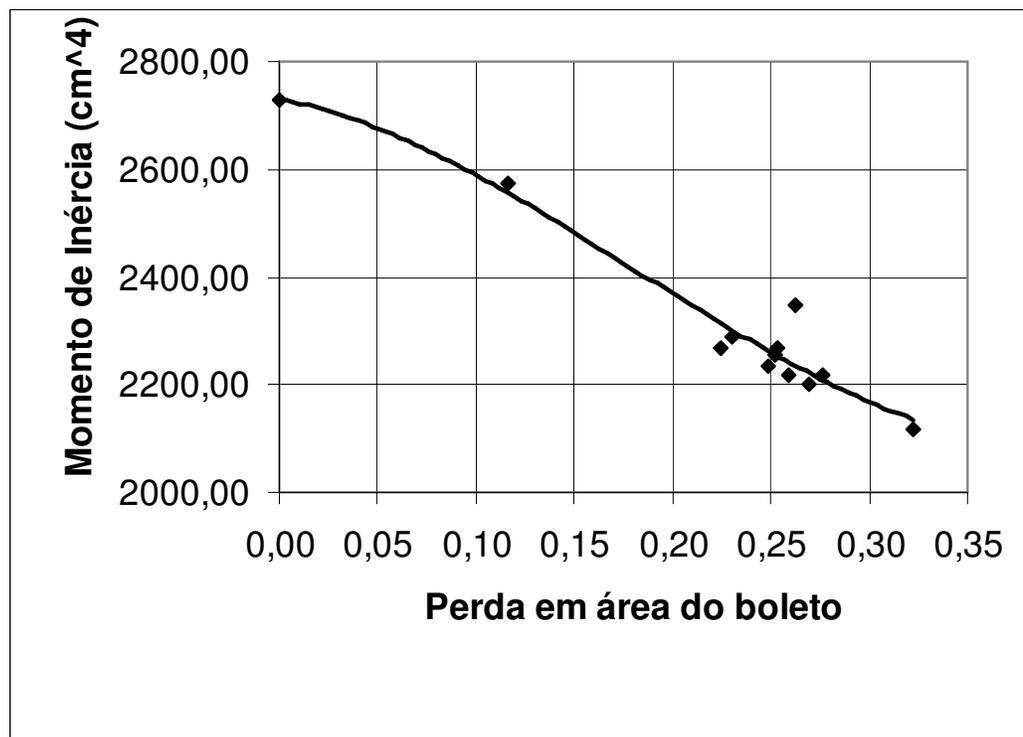


Figura 4.4 – Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia

Pela tabela 4.3 pode-se observar que, considerando que ocorra apenas desgaste vertical no trilho, o desgaste máximo de 10 milímetros corresponde à perda de 22% da área do boleto, ou seja, o valor está abaixo dos 25% adotados como limite.

Fixando o desgaste vertical em 10 milímetros e supondo que comece a ocorrer desgaste horizontal, verificou-se que o limite de 25% de perda em área do boleto é atingido quando o desgaste horizontal chega a 3 milímetros, ou seja, abaixo deste valor, o limite de 25% não será atingido. Quando o valor de 3 milímetros de desgaste horizontal é atingido, o desgaste máximo total, que é a soma do desgaste vertical com metade do desgaste horizontal, é de 11,5 milímetros, ou seja, o trilho poderia ser utilizado até este limite numa linha com tonelagem bruta anual de até 14 toneladas. Já para linhas onde o transporte é de mais de 14 toneladas, ocorrendo o desgaste vertical de 10 milímetros, não poderia ocorrer desgaste horizontal, para resultar no desgaste máximo total de 10 milímetros. Em todos estes casos, o limite de desgaste estaria abaixo dos 25% de perda em área do boleto. Os valores de desgaste total máximo estão estabelecidos pela tabela 2.2 do item 2.4.

Se ocorrer apenas desgaste horizontal num valor tal que o desgaste máximo seja atingido, a perda em área do boleto será superior aos 25%, mas, para isto, o trilho deverá sofrer um desgaste horizontal superior a 20 milímetros e este desgaste terá atingido a alma do trilho, o que é inaceitável para os padrões técnicos e de segurança.

Se o desgaste máximo vertical e o desgaste máximo total fossem atingidos ao mesmo tempo, o valor de perda em área do boleto superaria os 25%, porém, como ressalta a RFFSA (23 apud 4), o trilho deve ser substituído quando o primeiro dos limites for atingido.

Analisando os desgastes estipulados pela RFFSA (23 apud 4), não se pôde estabelecer uma relação direta entre os limites por ela determinados e o valor de 25% de perda em área do boleto, tendo em vista que não se apresentaram valores limites para o desgaste horizontal. Estudando os limites de desgaste vertical para o trilho TR-57, conclui-se que o valor fixado corresponde a 22% de perda, abaixo do convencional de 25%. Já para os limites de desgaste totais, como são uma combinação dos desgastes vertical e horizontal, não foi possível estabelecer

a relação desejada, já que os valores limites para o desgaste horizontal não são explicitados pela RFFSA.

Os limites de desgaste estabelecidos pela American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA), segundo Branco e Ferreira (24) foram mostrados na tabela 2.3, no item 2.4. Com base nos valores apresentados, foram simulados os desgastes no perfil do trilho TR-57, desenhado em AutoCad, conforme exemplo mostrado na figura 4.5 e foram calculados quanto estes desgastes representaram de perda em área do boleto. Estes valores são apresentados na tabela 4.4.

Foi estabelecida a equação 4.3, que relaciona a perda em área dos boletos dos trilhos desgastados (pd) com os momentos de inércia correspondentes (I), a partir do gráfico mostrado na figura 4.6. O coeficiente de determinação (R^2) encontrado para esta equação é 0,96, ou seja, o modelo se enquadra bem à situação analisada.

$$I = -528,32 \text{ pd}^2 - 1594,76 \text{ pd} + 2730,47 \quad (4.3)$$

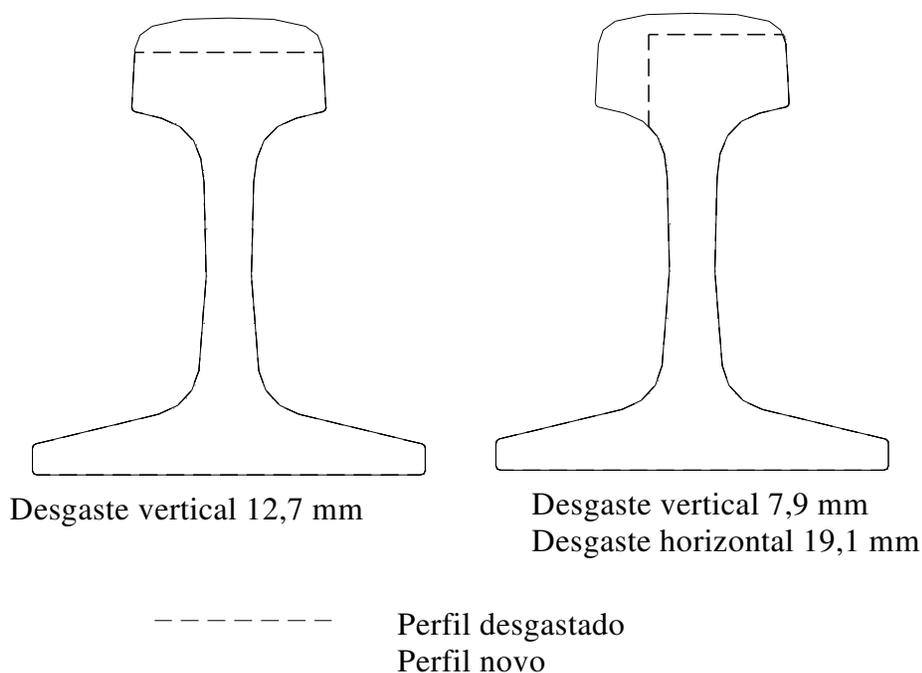


Figura 4.5 - Desenho simulando desgastes verticais e horizontais

Tabela 4.4 – Limites de desgaste conforme AREMA (24)

Desgaste vertical (mm)	Desgaste horizontal (mm)	Área do boleto (mm ²)	Perda boleto	I (cm ⁴)
0,00	0,00	2506,60	0,00	2730,47
3,20	0,00	2370,07	0,05	2616,21
7,90	0,00	2076,80	0,17	2376,47
9,50	0,00	1976,28	0,21	2295,12
12,70	0,00	1762,99	0,30	2123,65
0,00	7,90	2286,35	0,09	2612,45
0,00	19,10	1841,89	0,27	2369,48
0,00	22,20	1761,58	0,30	2288,40
3,20	7,90	2095,85	0,16	2493,54
7,90	19,10	1553,21	0,38	2052,76
9,50	19,10	1475,99	0,41	1980,86
12,70	22,20	1234,42	0,51	1776,65

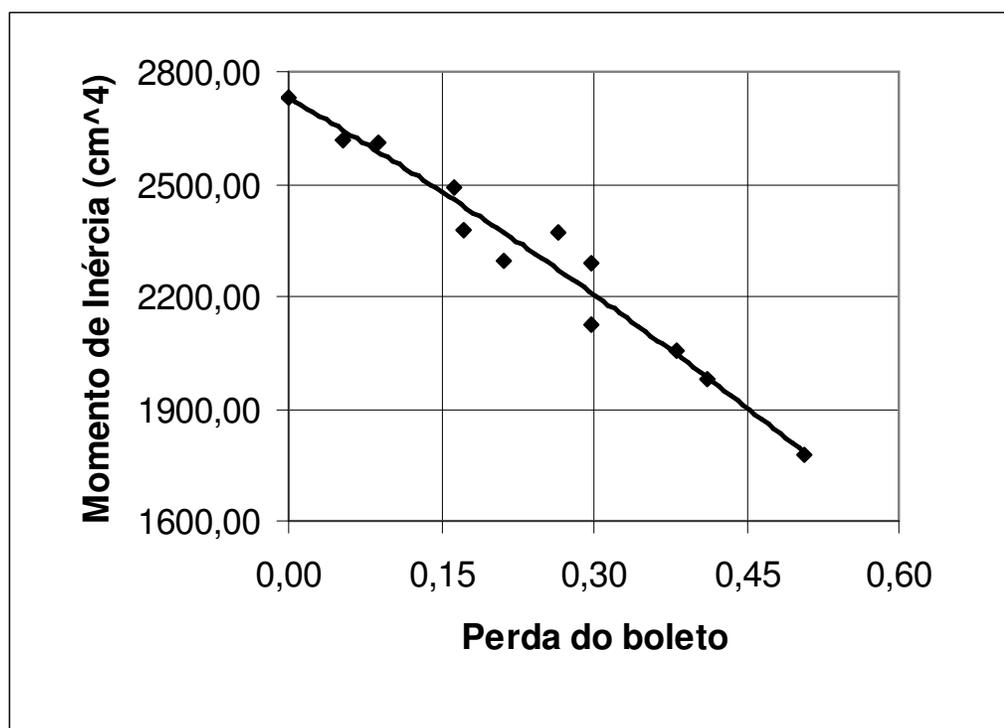


Figura 4.6 – Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia

Como já mostrado na tabela 2.3 do item 2.4, a AREMA fixa como limites de desgaste vertical 3,2 milímetros e de desgaste horizontal 7,9 milímetros, para trilhos em vias principais,

7,9 milímetros de desgaste vertical e 19,1 milímetros de desgaste horizontal para trilhos em ramais principais, 9,5 milímetros de desgaste vertical e 19,1 milímetros de desgaste horizontal para trilhos em ramais secundários e 12,7 milímetros de desgaste vertical e 22,2 milímetros de desgaste horizontal para trilhos em pátios (24).

Analisando a tabela 4.4 conclui-se que ocorrendo um desgaste vertical de 12,7 milímetros, que é o máximo admitido pela AREMA, haveria perda de 30% em área do boleto, portanto acima dos 25%. Um desgaste de até 9,5 milímetros corresponderia à perda de 21%, valor este abaixo dos 25%. Logo, para trilhos usados em vias principais, ramais principais e ramais secundários, os limites estabelecidos pela AREMA corresponderiam à perda menor que 25% em área do boleto. Se ocorresse apenas desgaste horizontal, a perda em área do boleto estaria abaixo dos 25% apenas para o valor de 7,9 milímetros, que corresponderia ao limite para vias principais, sendo, neste caso, a perda correspondente a 9%. Para o ramal principal e secundário, a perda seria de 27% em área do boleto, e para o pátio, o limite de desgaste horizontal representaria 30% de perda em área do boleto, valores superiores aos 25% aceitos como limite.

Combinando os desgastes vertical e horizontal fixados pela AREMA (24), apenas para trilhos em via principal a perda estaria abaixo de 25%, o desgaste máximo vertical de 3,2 milímetros e horizontal de 7,9 milímetros, o que representariam 16% de perda em área do boleto. Para os demais limites de desgaste estabelecidos, as perdas seriam de 38%, 41% e 51% de área do boleto para os ramais principais, secundários e para o pátio, respectivamente, valores muito acima dos 25% convencionais.

Conclui-se que não há proximidade entre os limites de desgaste vertical e horizontal estabelecidos pela AREMA e o valor de 25% estudado.

Continuando com os estudos de referência, segundo Roney (25 apud 24), a Canadian Pacific Railroad (CPR) faz o gerenciamento do desgaste do trilho TR-57, conforme reproduzido na figura 2.7 do item 2.4.

Foram escolhidos valores de desgaste vertical e horizontal da citada figura nos limites das linhas A, B e C, que correspondem respectivamente aos limites para substituição de trilhos

curtos e antigos, longos e soldados e trilhos para sucatear. Os valores selecionados foram desenhados sobre o perfil do trilho TR-57, utilizando-se do AutoCad. Um exemplo desta sobreposição é mostrado na figura 4.7.

Foram medidos quanto os desgastes simulados representaram em perda em área do boleto e estes valores são apresentados na tabela 4.5.

A relação entre a perda em área dos boletos e os momentos de inércia correspondentes é mostrada na equação 4.4, onde pd é a perda em área do boleto e I o momento de inércia. O coeficiente de determinação desta equação é 0,96, bastante satisfatório. O gráfico que mostra a relação entre as variáveis é apresentado na figura 4.8.

$$I = 723,25 pd^3 - 2344,48 pd^2 - 1177,42 pd + 2730,47 \quad (4.4)$$

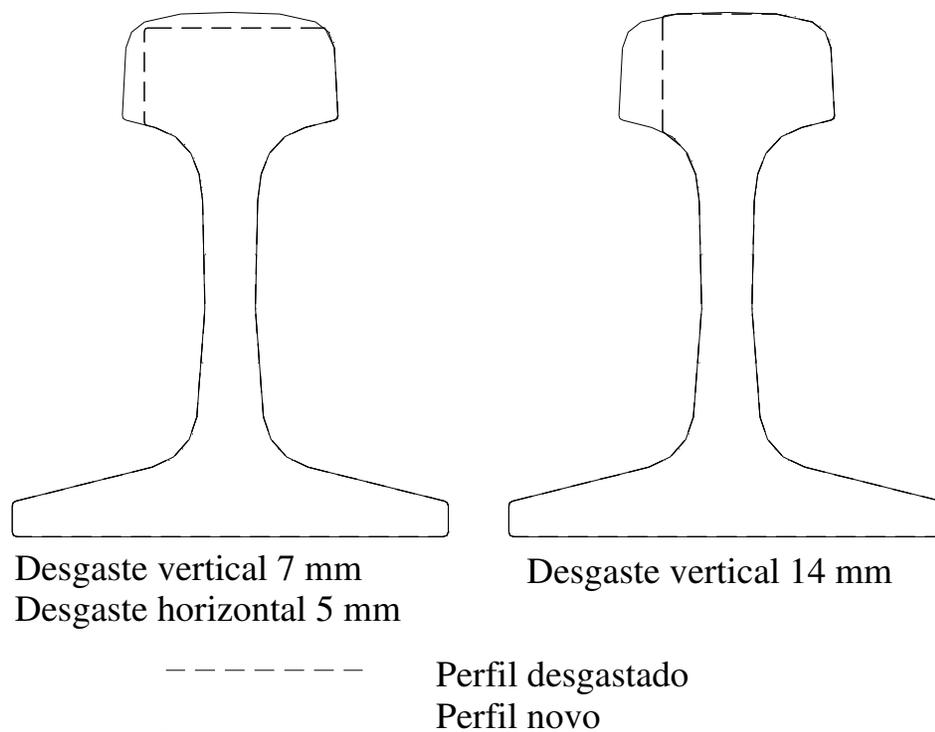


Figura 4.7 - Desenho simulando desgastes verticais e horizontais

Tabela 4.5 – Limites de desgaste conforme CPR (25 apud 24)

	Desgaste vertical (mm)	Desgaste horizontal (mm)	Área do boleto (mm ²)	Perda boleto	I (cm ⁴)
	0,00	0,00	2506,60	0,00	2730,47
Linha C	17,00	0,00	1473,52	0,41	1892,74
	16,00	3,00	1493,79	0,40	1916,22
	13,00	10,00	1528,91	0,39	1973,55
	8,00	17,00	1610,20	0,36	2091,10
	0,00	20,00	1847,72	0,26	2346,68
Linha B	14,00	0,00	1675,94	0,33	2053,96
	12,00	6,00	1683,86	0,33	2083,73
	10,00	8,00	1755,60	0,30	2154,80
	3,00	16,00	1886,34	0,25	2336,85
	0,00	17,00	1962,77	0,22	2420,65
Linha A	10,00	1,00	1932,68	0,23	2262,90
	7,00	5,00	2019,96	0,19	2357,99
	3,00	10,00	2093,29	0,16	2462,39
	2,00	14,00	2002,72	0,20	2422,67
	0,00	17,00	1962,77	0,22	2420,65

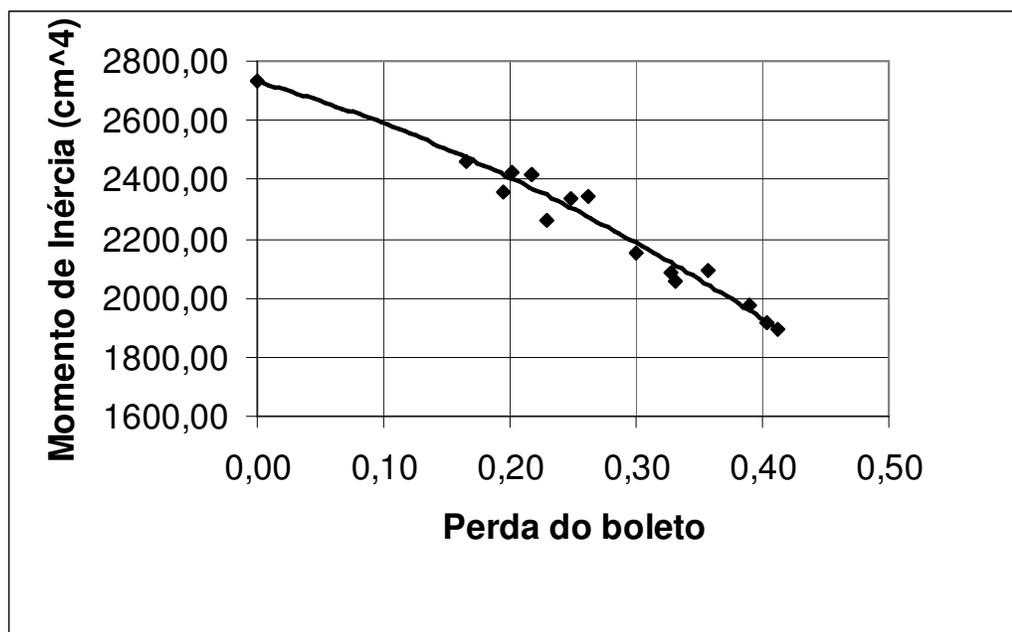


Figura 4.8 – Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia

Observando a tabela 4.5 e a figura 2.7 do item 2.4, conclui-se que, para valores de desgastes delimitados pela linha A, em que é prevista a substituição de trilhos curtos e antigos, a perda equivalente em área do boleto é menor que 25%. A zona de possível troca do trilho encontra-se abaixo destes limites, portanto é recomendado pela CPR trocar o trilho antes que a perda atinja os 25%. A zona recomendada para inversão de lado do trilho encontra-se composta por desgastes que resultam em perda menor que 25%.

Analisando os valores da tabela 4.5 e da figura 2.7 do item 2.4, que determinam a linha B, em que é prevista a substituição de trilhos longos e soldados, a perda varia de 22 a 33% em área do boleto, sendo que o valor de 25% de perda ocorre se o desgaste vertical atingir 3 milímetros e o desgaste horizontal, 16 milímetros.

A linha C da tabela 4.5 e da figura 2.7 do item 2.4 é a que prevê o sucateamento do trilho. A perda em área do boleto varia de 26% a 41%, estando, portanto, acima dos 25% para todos os pontos.

A relação que se pôde estabelecer é que as zonas de troca de trilho e de inversão de lado ocorrem quando os desgastes representam menos que 25% de perda em área do boleto. A substituição dos trilhos curtos e antigos está prevista para um desgaste recomendado pela CPR (25 apud 24), correspondente a menos de 25% de perda em área do boleto.

Como foi visto no item 2.11, quando há desgaste do trilho, o ângulo de inclinação da face ativa do trilho é substituído pelo ângulo de desgaste. Para Esveld (38), o ângulo de desgaste para prevenir a subida da roda no trilho é limitado a 32 °.

Partindo-se de um ângulo da face ativa do trilho igual a 60° que, segundo Magalhães (42), é o ângulo para que a relação entre os esforços laterais e verticais seja menor ou igual a 0,8, ou seja, menor que o limite crítico para que a roda comece a se elevar do trilho, foram simulados desgastes no perfil do trilho TR-57, desenhado em AutoCad, conforme exemplo apresentado nas figuras 4.9 e 4.10.

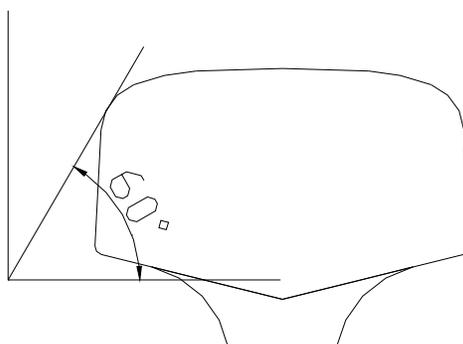


Figura 4.9 – Ângulo da face ativa

Foram calculadas as perdas em área dos boletos correspondentes a cada ângulo de desgaste simulado. Os resultados são apresentados na tabela 4.6.

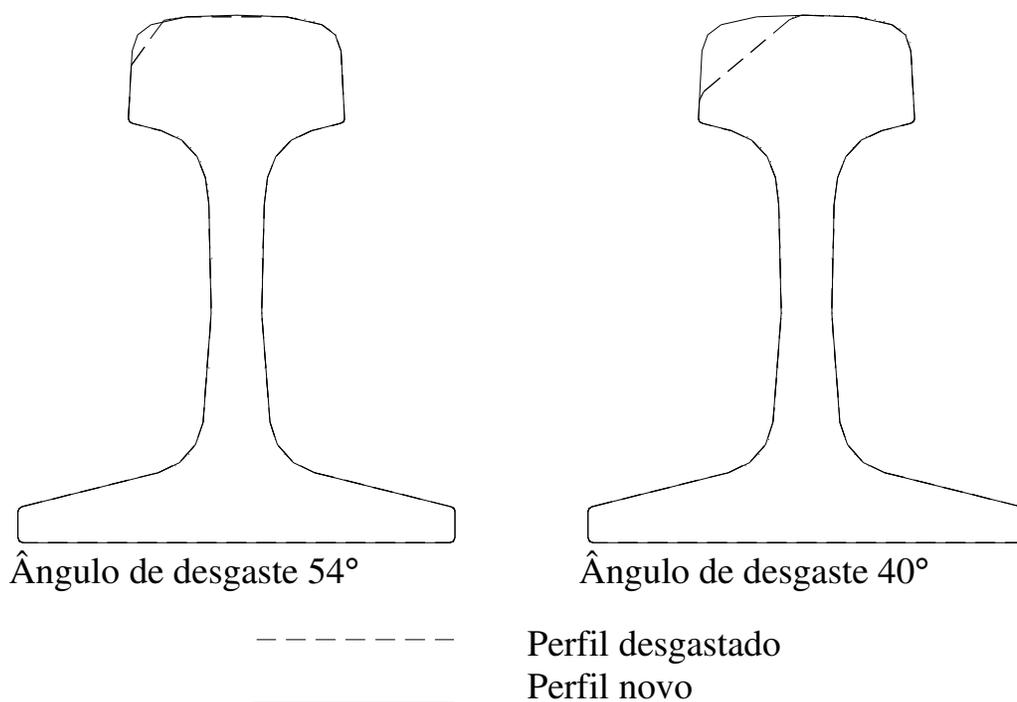


Figura 4.10 - Desenho simulando ângulos de desgaste

Tabela 4.6 – Ângulos de desgaste

Ângulo (°)	Área do boleto (mm ²)	Perda boleto	I (cm ⁴)
60	2506,60	0,00	2730,47
58	2496,86	0,00	2723,40
56	2481,08	0,01	2712,01
54	2460,26	0,02	2697,06
52	2434,65	0,03	2678,74
50	2404,28	0,04	2657,02
48	2369,49	0,05	2632,18
46	2330,47	0,07	2604,36
44	2286,74	0,09	2573,05
42	2237,83	0,11	2537,89
40	2183,73	0,13	2498,72
38	2123,51	0,15	2454,57
36	2055,83	0,18	2404,55
34	1981,08	0,21	2348,35
32	1890,96	0,25	2285,34
30	1805,52	0,28	2212,32

A relação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia é representada pela equação 4.5, e o gráfico entre as variáveis, apresentado na figura 4.11, onde pd é a perda em área do boleto e I é o momento de inércia. O coeficiente de determinação desta equação (R^2) é 1, ou seja, a correlação é plenamente satisfatória.

$$I = -261,63pd^2 - 1766,86pd + 2730,47 \quad (4.5)$$

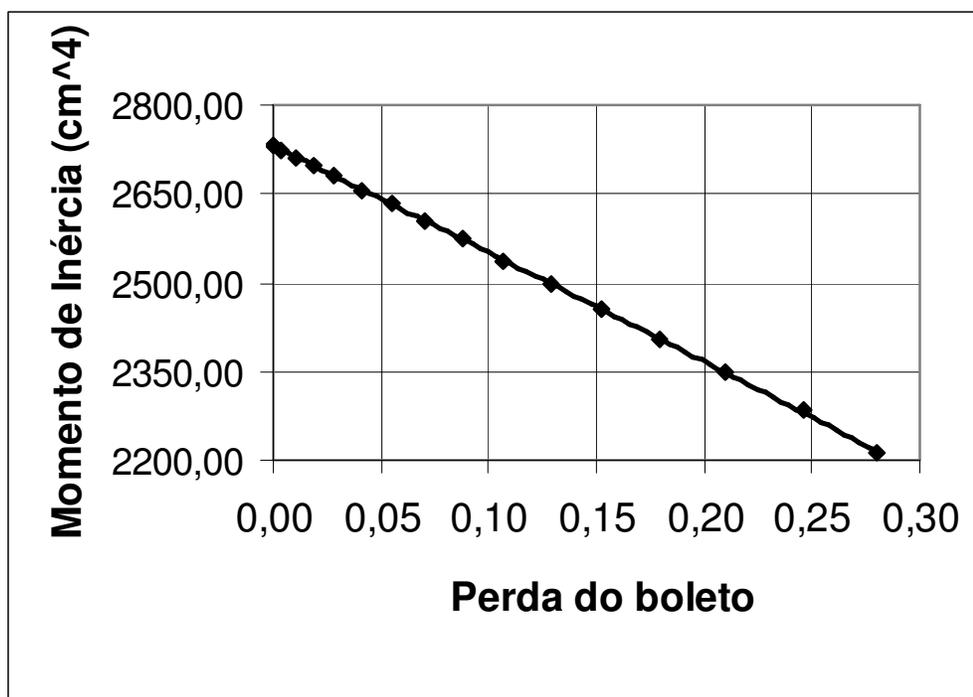


Figura 4.11 – Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia

Analisando a tabela 4.6 pode-se concluir que o ângulo de desgaste de 32° é o que corresponde a uma perda em área do boleto de 25%. Este ângulo de desgaste é o mesmo citado por Esveld (38) como limite de descarrilamento. Portanto, encontrou-se uma relação entre o limite de descarrilamento e o limite de perda em área do boleto aceito pelo meio ferroviário.

Como o critério estabelecido por Esveld (38) não está condicionado ao tipo de trilho, testou-se o ângulo de desgaste para os trilhos TR-45, TR-50 e TR-68, a fim de verificar se o ângulo de 32° corresponde à perda de 25% em área do boleto para estes tipos de trilho. O resultado é mostrado na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Ângulos de desgaste

Trilho	Ângulo (°)	Área do boleto (mm ²)	Perda boleto	I (cm ⁴)
TR-45	32	1405,59	0,32	1256,93
TR-50	32	1708,90	0,31	1641,78
TR-68	32	2236,80	0,29	3273,91

Observando a tabela 4.7, conclui-se que o ângulo de desgaste de 32° representa uma perda em área do boleto de 32%, para o trilho TR-45, de 31% para o trilho TR-50 e de 29%, para o trilho TR-68.

Portanto, a relação entre o limite de descarrilamento, citado por Esveld (38), e o valor de 25% de perda em área do boleto só é válida para o trilho tipo TR-57.

4.3 O estudo do desgaste em campo

Foram analisados 250 perfis de trilho do tipo TR-57 em uso na linha A da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM). As medições foram feitas em segmentos amostrais selecionados em trechos de via dupla entre a Lapa e Jundiaí. Em cada segmento amostral, as leituras de desgaste do boleto foram realizadas nos dois trilhos das duas vias.

Foi utilizado o perfilógrafo *Laserail*®, descrito no item 3.3, para medição dos desgastes. Obtiveram-se 250 desenhos em arquivo tipo PDF, correspondentes aos perfis medidos, além de informações como porcentagem de desgaste em área do boleto e desgastes vertical e horizontal sofridos. Na figura 4.12 é mostrado um exemplo de perfil obtido pelo *Laserail*.

Os perfis obtidos em formato PDF foram redesenhados, recorrendo-se ao programa de desenho AutoCad 2002®*. Um exemplo do perfil redesenhado do *Laserail*® para o AutoCad®* é mostrado na figura 4.13.

* O AutoCad 2002 ® é marca registrada da empresa de software Autodesk.

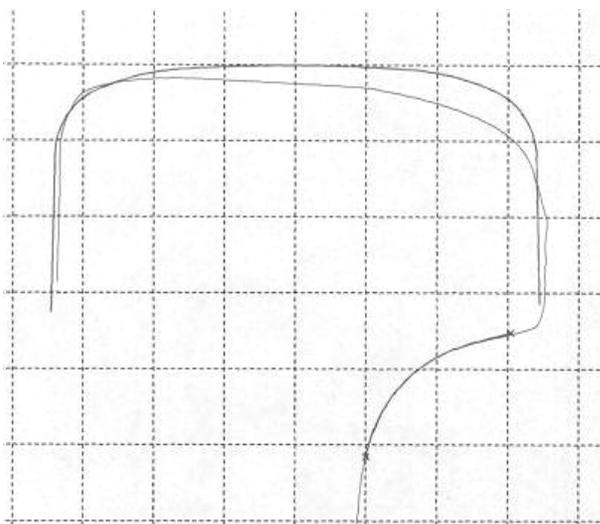


Figura 4.12 - Perfil 1 - Aparelho de medição

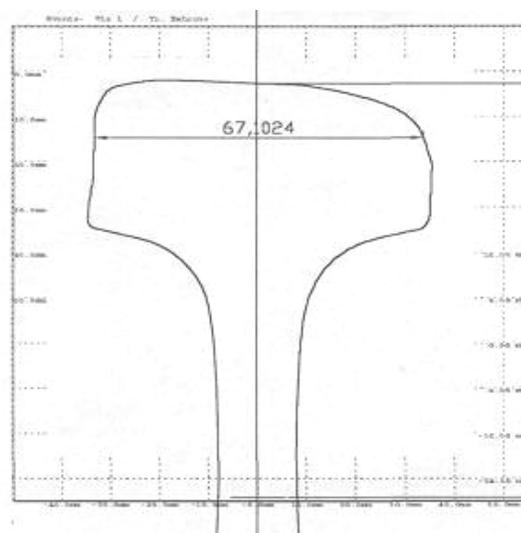
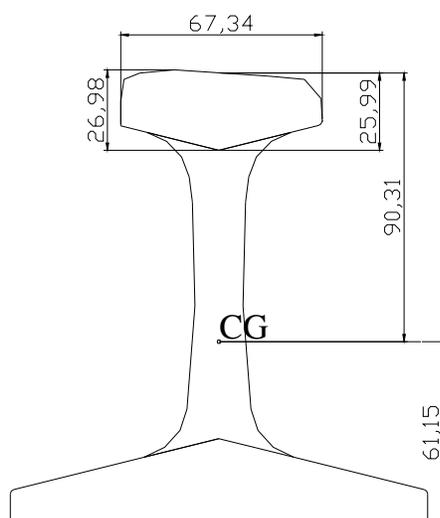


Figura 4.13 - Perfil 1 desgastado - AutoCad

O trilho TR-57 novo apresenta momento de inércia de $2.730,47 \text{ cm}^4$ (18) e, considerando-se que este perfil equivale à perda de 0%, observou-se que alguns perfis medidos resultaram em um momento de inércia maior que $2.730,47 \text{ cm}^4$, embora apresentassem perda maior ou igual a 0%. Esta incoerência pode ser atribuída a um erro no desenho ou na medição do trilho. Os perfis que apresentaram perda com momento de inércia maior que o equivalente à perda de 0% foram desconsiderados para os cálculos, e aos perfis que apresentaram perda de 0% foram atribuídos momentos de inércia iguais a $2.730,47 \text{ cm}^4$, passando-se de 250 para 212 perfis a serem analisados.

Através do desenho no programa AutoCad® foram obtidos os momentos de inércia dos perfis, o centro de gravidade e medidas as distâncias às fibras extremas, conforme item 2.9. Também foram calculados os momentos resistentes do boleto (W_b) e do patim (W_p), segundo o item 2.9. Os resultados para os perfis 1 a 19 são apresentados na tabela 4.8. Os resultados dos demais perfis encontram-se nas tabelas A.1 a A.5 do anexo A .

O perfil 124 desenhado em AutoCad® é apresentado na figura 4.14 para exemplificar o procedimento.



Área = 14,09 cm²

Momento de inércia = 1845,94 cm⁴

Figura 4.14 – Perfis desenhados em AutoCad®

Tabela 4.8 – Perfis analisados

Perfil	% perda	I (mm ⁴)	y inf (mm)	Wp (cm ³)	y sup (mm)	Wb (cm ³)
1	0,07	26117754,25	74,06	352,65	91,66	284,94
2	0,05	26730086,70	75,04	356,21	91,64	291,70
3	0,05	26658287,12	74,91	355,86	91,42	291,61
4	0,04	26791893,39	75,16	356,46	91,51	292,76
5	0,08	25776462,01	73,49	350,74	91,91	280,46
6	0,05	26524634,34	74,70	355,08	92,18	287,76
7	0,04	26616978,50	74,90	355,34	91,73	290,18
8	0,07	26124462,83	74,12	352,45	90,46	288,80
9	0,03	26930930,02	75,30	357,66	92,19	292,13
10	0,05	26346193,30	74,24	354,90	94,28	279,44
11	0,09	25902189,35	73,87	350,65	89,44	289,60
12	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
13	0,03	27192112,01	75,83	358,58	90,88	299,22
14	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
15	0,03	27124599,12	75,68	358,39	91,84	295,34
16	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
17	0,01	27274749,91	75,83	359,67	92,19	295,85
18	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
19	0,07	25974990,11	73,83	351,83	91,48	283,93

As variações da perda em área medida no boleto, em função do momento de inércia do perfil, são apresentadas na figura 4.15. Como pode ser observado, foi registrado maior número de medições no intervalo entre 0 e 15% de perda em área do boleto. As perdas entre 15% e 30% representam 30,7% das medições e as perdas acima de 30%, 2,8%, enquanto as perdas abaixo de 15% representam 66,5% do total de perfis medidos. As perdas abaixo até 25% em área do boleto representam 92,5% do total de perfis analisados.

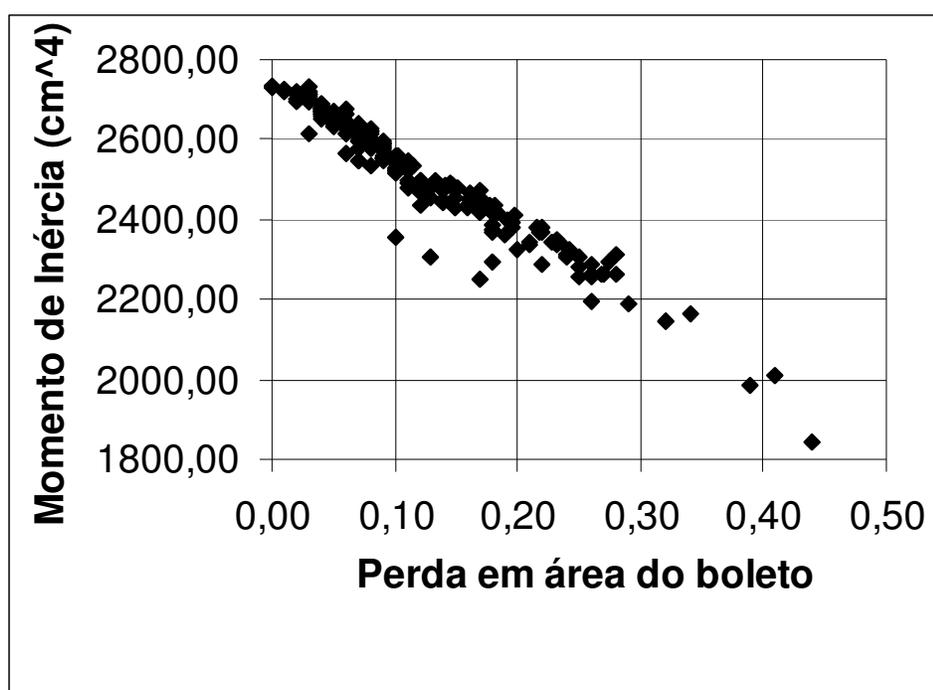


Figura 4.15 – Variação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia

Foram experimentadas equações de ajuste de diversos tipos (linear, polinomial, exponencial, logarítmica), procurando-se estabelecer a melhor correlação entre a perda em área do boleto (pb) e o momento de inércia (I) dos perfis apresentados e chegou-se à conclusão que a melhor correlação é a representada pela equação 4.6 e pela figura 4.16. O coeficiente de determinação (R^2) desta equação é 0,95, o que significa que 95% da variação do momento de inércia podem ser explicados pela correlação, ou seja, o coeficiente de determinação é satisfatório, revelando que o modelo se enquadra bem à situação analisada.

$$I = -53,68 pb^2 - 1790,64 pb + 2730,47 \quad (4.6)$$

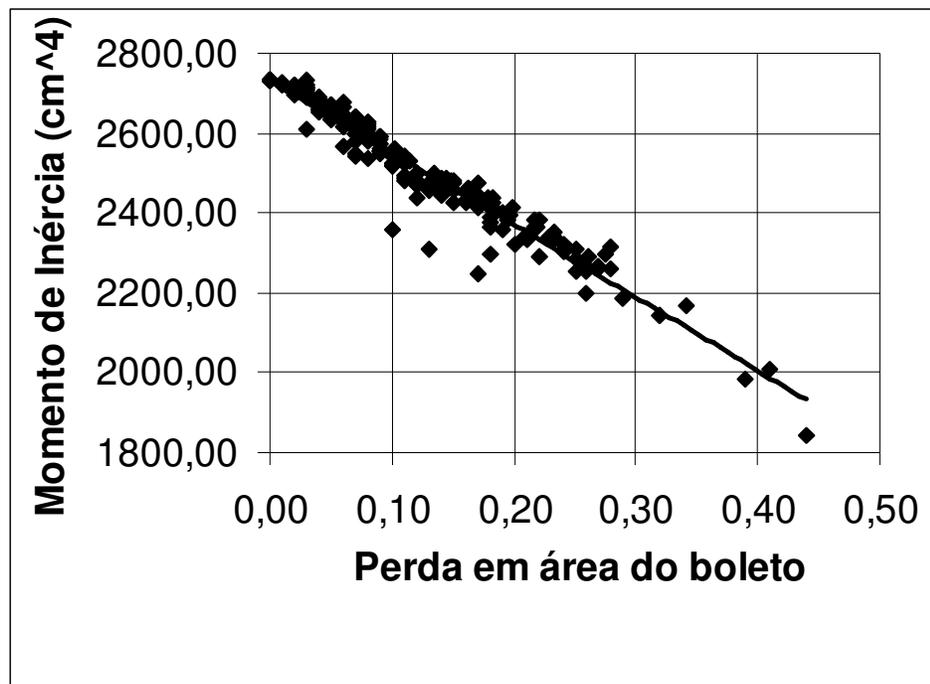


Figura 4.16 – Correlação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia

Também foram ajustadas as equações 4.7 e 4.8 para relacionar a perda em área do boleto (pb) com o momento resistente do patim (W_p) e o momento resistente do boleto (W_b), respectivamente. Os gráficos que mostram a relação entre as variáveis são mostrados nas figuras 4.17 e 4.18.

O coeficiente de determinação (R^2) da equação 4.7 é 0,94, portanto satisfatório, e o R^2 da equação 4.8 é 0,92, o que significa que 92% da variação do momento resistente do boleto podem ser explicados pela correlação.

$$W_p = -507,67 (pb^3) + 227,60 (pb^2) - 124,92 (pb) + 360,00 \quad (4.7)$$

$$W_b = 1062,65 (pb^3) - 549,82 (pb^2) - 155,36 (pb) + 295,40 \quad (4.8)$$

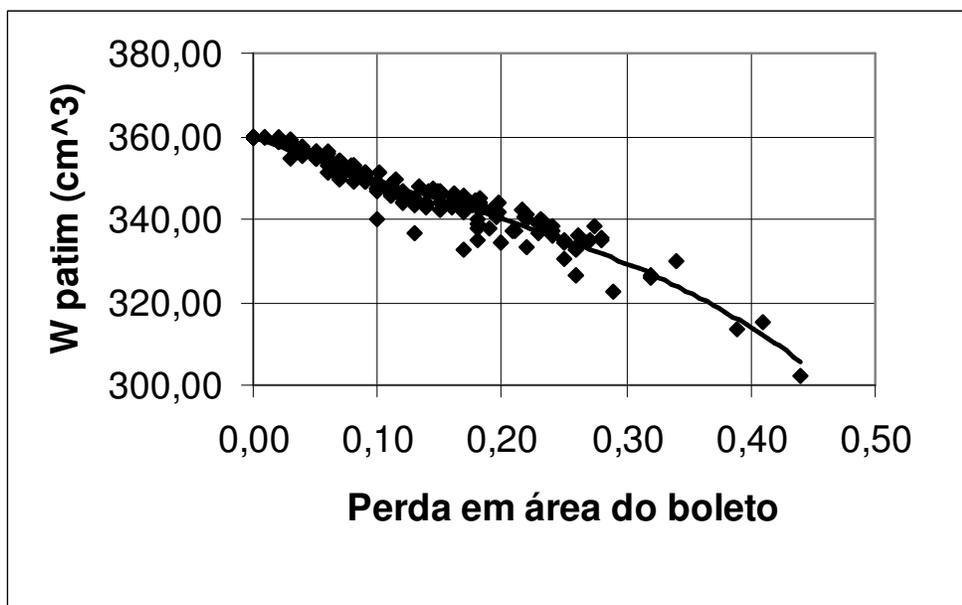


Figura 4.17 – Correlação entre o momento resistente do patim e a perda em área do bolete

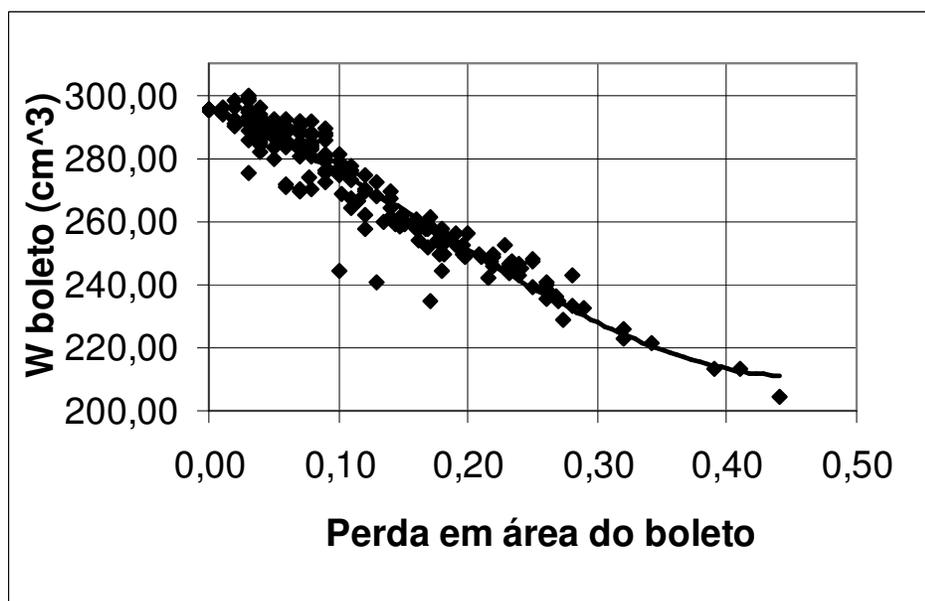


Figura 4.18 – Correlação entre momento resistente do bolete e a perda em área do bolete

Os momentos resistentes são obtidos dividindo o momento de inércia pelas distâncias às fibras extremas correspondentes. O momento resistente do patim é obtido dividindo o momento de inércia pelo y inferior e o momento resistente do boleto, pelo y superior.

Observando-se a figura 4.16, conclui-se que dois perfis podem ter diferentes momentos de inércia e ter a mesma porcentagem em área desgastada, ou seja, cada valor de perda em área do boleto pode corresponder a mais de um valor de momento de inércia. Isto se deve à forma como ocorreu o desgaste, o ângulo ou plano de ocorrência. O mesmo acontece para as distâncias às fibras extremas, ou seja, dois perfis podem apresentar mesma perda em porcentagem de área, mas a distância entre seus centros de gravidade e às fibras extremas serem diferentes. Um exemplo disto é apresentado na figura 4.19.

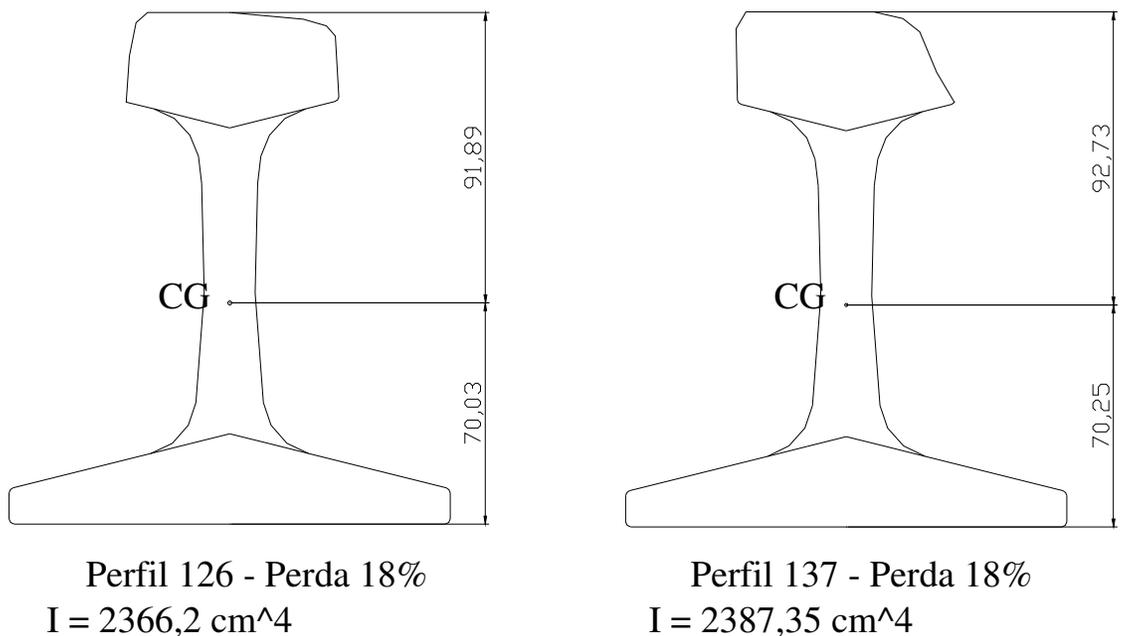


Figura 4.19 – Perfis com mesma perda em área do boleto

Baseado nesta observação, uma nova correlação foi estabelecida, considerado, para cada valor de perda em área do boleto, o momento de inércia obtido a partir da média aritmética dentre

os valores medidos. Os valores dos momentos resistentes também foram calculados através da média aritmética dos valores encontrados para cada perda, conforme a tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Perda e média dos momentos de inércia e dos momentos resistentes

Perda	I (mm ⁴)	Wp (cm ³)	Wb (cm ³)
0	27304700,00	360,00	295,40
0,01	27244669,00	359,65	294,86
0,02	27097647,80	358,82	293,45
0,03	27006148,57	358,01	292,35
0,04	26735687,38	356,56	289,22
0,05	26522119,38	355,24	287,83
0,06	26277504,54	353,74	285,59
0,07	26029326,00	352,23	284,00
0,08	25958744,00	351,64	283,66
0,09	25704290,82	350,12	281,26
0,1	25123876,00	347,21	272,03
0,11	25132895,00	347,23	271,21
0,12	24770357,00	345,33	266,63
0,13	24355349,00	343,25	260,04
0,14	24674319,00	344,82	264,26
0,15	24660205,00	345,40	260,30
0,16	24458474,00	344,46	257,79
0,17	24147036,00	342,44	254,25
0,18	24030322,00	341,82	253,27
0,19	23799828,00	339,95	254,26
0,2	23764647,00	340,10	251,65
0,21	23378872,00	337,25	249,14
0,22	23570061,00	339,45	246,67
0,23	23415280,00	338,84	246,90
0,24	23134647,00	337,17	244,77
0,25	22822167,00	333,30	238,50
0,26	22516586,00	332,20	238,50
0,27	22738667,00	335,70	233,18
0,28	22881350,00	335,26	237,90
0,29	21868997,00	322,81	232,85
0,32	21455094,50	325,95	224,21
0,34	21655200,00	329,83	221,15
0,39	19845259,00	313,56	213,30
0,41	20080400,00	315,23	213,17
0,44	18459409,00	302,12	204,40

O gráfico que relaciona a perda com o momento de inércia é mostrado na figura 4.20. A melhor correlação entre as variáveis é dada pela equação 4.9. O coeficiente de determinação (R^2) desta equação é 0,98, portanto satisfatório, revelando que o modelo se enquadra bem à situação avaliada.

$$I = -280,52 (pb)^2 - 1733,88 (pb) + 2730,47 \quad (4.9)$$

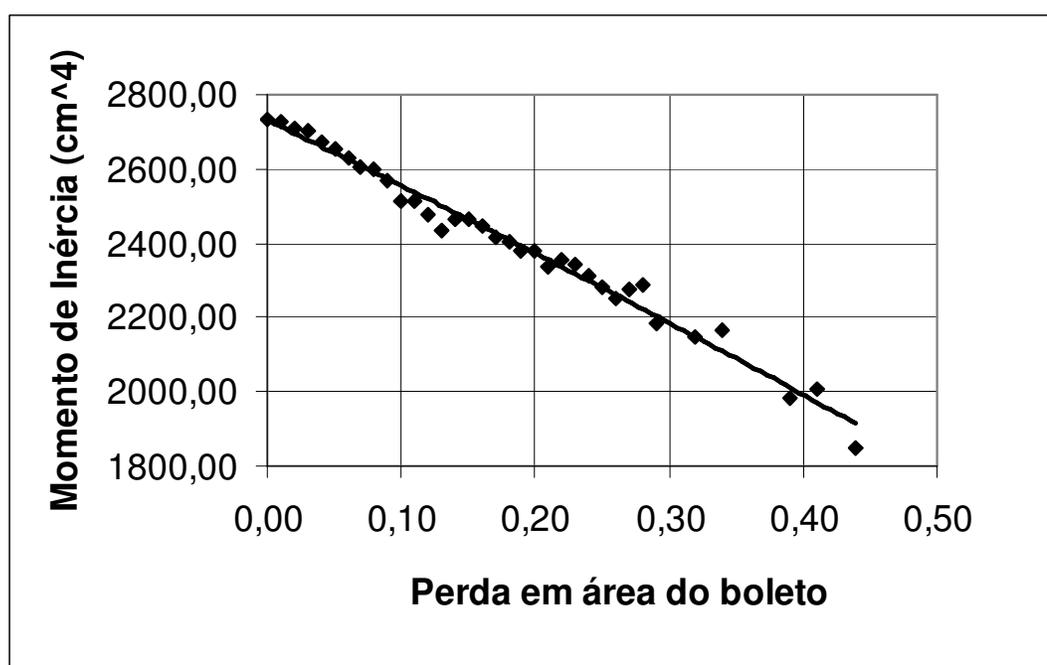


Figura 4.20 – Correlação entre a perda em área do boleto e o momento de inércia

A equação 4.10 é a que melhor relaciona a perda em área do boleto com momento resistente do patim, e o gráfico correspondente é mostrado na figura 4.21. O coeficiente de determinação (R^2) desta equação é 0,97, portanto, satisfatório.

$$Wp = -671,72 (pb)^3 + 324,93 (pb)^2 - 138,52 pb + 360,00 \quad (4.10)$$

A relação entre a perda em área do boleto e momento resistente do boleto é representada pela equação 4.11 e apresentada no gráfico 4.22. O R^2 desta equação é 0,99, portanto satisfatório.

$$W_b = 500,97 (pb)^3 - 236,02 (pb)^2 - 194,41 (pb) + 295,40 \quad (4.11)$$

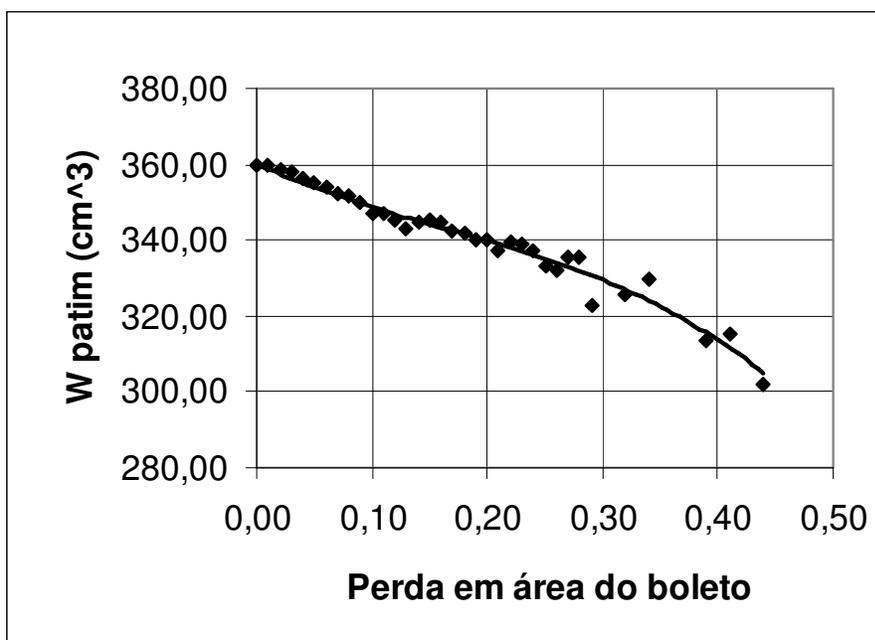


Figura 4.21 – Correlação entre o momento resistente do patim e a perda em área do bolete

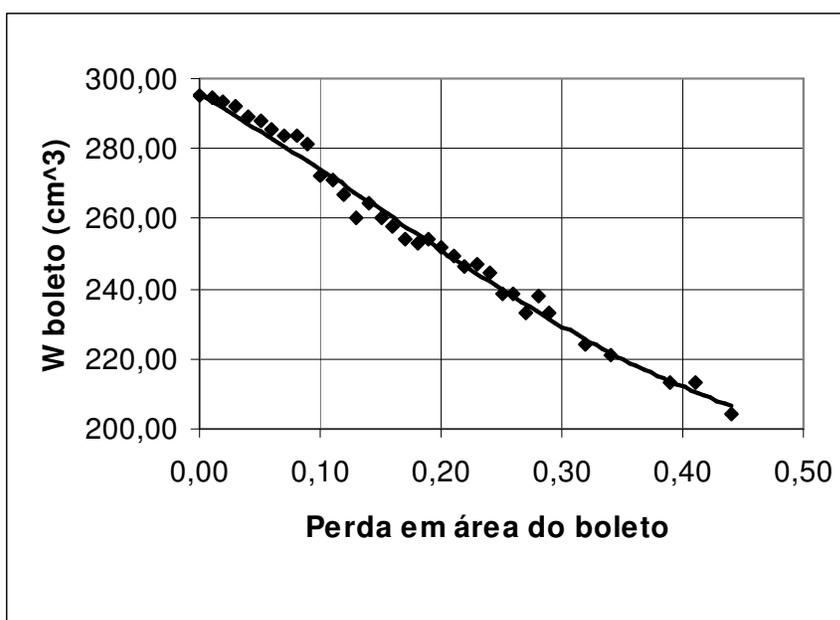


Figura 4.22 – Correlação entre o momento resistente do bolete e a perda em área do bolete

Foram encontradas, portanto, as equações que melhor relacionam as perdas em área dos boletos com os momentos de inércia e os momentos resistentes em duas situações. A primeira situação com todos os 212 perfis selecionados para análise, e a segunda, com as médias aritméticas das variáveis que correspondiam à mesma perda em área do boleto, resultando em 35 pontos, conforme descrito anteriormente. Assim, têm-se as equações 4.6 e 4.9, para o momento de inércia, 4.7 e 4.10, para o momento resistente do patim, e 4.8 e 4.11, para o momento resistente do boleto.

Com a finalidade de se comparar as equações obtidas para as duas situações, foram reunidas as curvas determinadas por estas na figura 4.23, para os momentos de inércia, 4.24, para o momento resistente do patim, e 4.25 para o momento resistente do boleto.

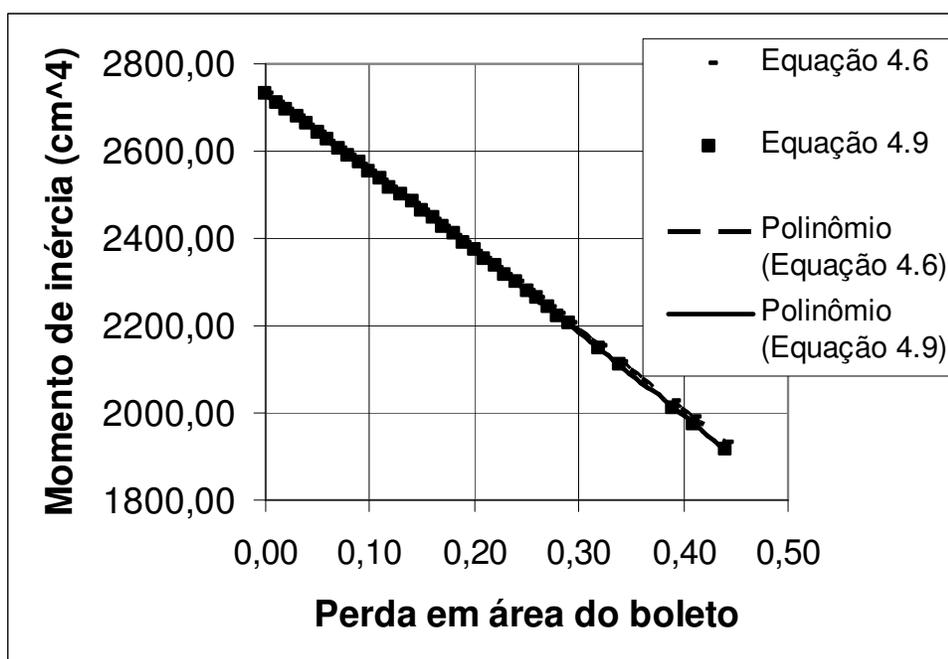


Figura 4.23 – Comparação entre as equações 4.6 e 4.9

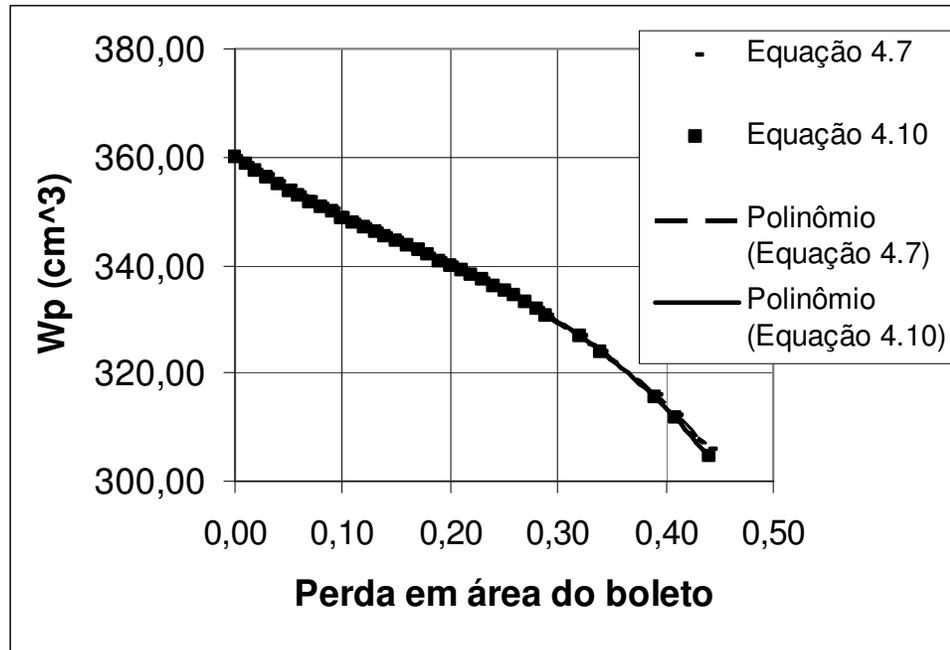


Figura 4.24 – Comparação entre as equações 4.7 e 4.10

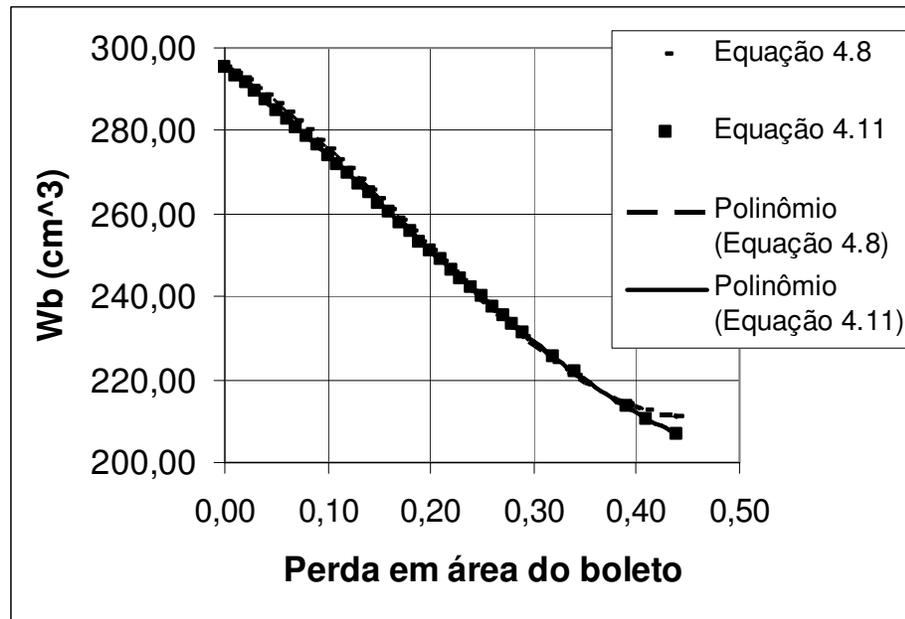


Figura 4.25 – Comparação entre as equações 4.8 e 4.11

Os valores dos momentos de inércia obtidos pelas equações 4.6 e 4.9 são apresentados na tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Comparação entre as equações 4.6 e 4.9

Perda	I (cm ⁴)- Equação 4.6	I (cm ⁴)- Equação 4.9
0	2730,47	2730,47
0,01	2712,56	2713,10
0,02	2694,64	2695,68
0,03	2676,70	2678,20
0,04	2658,76	2660,67
0,05	2640,80	2643,07
0,06	2622,84	2625,43
0,07	2604,86	2607,72
0,08	2586,88	2589,96
0,09	2568,88	2572,15
0,1	2550,87	2554,28
0,11	2532,85	2536,35
0,12	2514,82	2518,36
0,13	2496,78	2500,32
0,14	2478,73	2482,23
0,15	2460,67	2464,08
0,16	2442,59	2445,87
0,17	2424,51	2427,60
0,18	2406,42	2409,28
0,19	2388,31	2390,91
0,2	2370,19	2372,47
0,21	2352,07	2353,98
0,22	2333,93	2335,44
0,23	2315,78	2316,84
0,24	2297,62	2298,18
0,25	2279,46	2279,47
0,26	2261,27	2260,70
0,27	2243,08	2241,87
0,28	2224,88	2222,99
0,29	2206,67	2204,05
0,32	2151,97	2146,90
0,34	2115,45	2108,52
0,39	2023,96	2011,59
0,41	1987,28	1972,42
0,44	1932,20	1913,25

Os valores dos momentos resistentes para o patim, obtidos através das equações 4.7 e 4.10 e dos momentos resistentes do boleto, obtidos pelas equações 4.8 e 4.11, são apresentados na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Comparação entre equações

Perda	Wp (cm ³)- Equação 4.7	Wp (cm ³)- Equação 4.10	Wb (cm ³)- Equação 4.8	Wb (cm ³)- Equação 4.11
0	360,00	360,00	295,40	295,40
0,01	358,77	358,65	293,79	293,43
0,02	357,59	357,35	292,08	291,42
0,03	356,44	356,12	290,27	289,37
0,04	355,33	354,94	288,37	287,28
0,05	354,26	353,80	286,39	285,15
0,06	353,21	352,71	284,33	282,99
0,07	352,20	351,67	282,20	280,81
0,08	351,20	350,65	280,00	278,59
0,09	350,23	349,68	277,74	276,36
0,1	349,28	348,73	275,43	274,10
0,11	348,34	347,80	273,07	271,83
0,12	347,41	346,90	270,68	269,54
0,13	346,49	346,01	268,25	267,24
0,14	345,58	345,13	265,79	264,93
0,15	344,67	344,27	263,31	262,62
0,16	343,76	343,40	260,82	260,30
0,17	342,85	342,54	258,32	257,99
0,18	341,93	341,68	255,82	255,68
0,19	341,00	340,80	253,32	253,38
0,2	340,06	339,92	250,84	251,08
0,21	339,10	339,02	248,37	248,80
0,22	338,13	338,10	245,92	246,54
0,23	337,13	337,16	243,51	244,30
0,24	336,11	336,19	241,13	242,07
0,25	335,06	335,18	238,80	239,87
0,26	333,98	334,14	236,52	237,70
0,27	332,87	333,07	234,29	235,56
0,28	331,72	331,94	232,12	233,46
0,29	330,53	330,77	230,02	231,39
0,32	326,70	326,94	224,20	225,44
0,34	323,88	324,06	220,78	221,71
0,39	315,78	315,55	214,22	213,40
0,41	312,05	311,53	212,52	210,54
0,44	305,85	304,74	211,12	206,84

Pode-se observar pela tabela 4.10 que os valores dos momentos de inércia calculados em cada equação variam pouco. Assim sendo, como a equação 4.9 foi a que apresentou maior coeficiente de determinação, esta pode ser considerada a mais adequada para representar a correlação existente entre o momento de inércia e a perda em área do boleto.

Observando a tabela 4.11, comparando-se os resultados para o momento resistente do patim, calculados através das equações 4.7 e 4.10, conclui-se que a diferença entre os valores é mínima, portanto a equação que representa melhor a relação entre a perda em área do boleto e o momento resistente do patim é a 4.10, que apresenta maior coeficiente de determinação.

Ainda pela tabela 4.11, os valores obtidos pelas equações 4.8 e 4.11 para o momento resistente do boleto apresentam pequena diferença, então a equação 4.11 foi considerada a que melhor representa esta relação devido ao seu coeficiente de determinação ser maior.

Deste estudo, pode-se considerar que a equação 4.9 é a que melhor representa a relação entre o momento de inércia e a perda em área do boleto e as equações 4.10 e 4.11 são as que melhor relacionam a perda em área do boleto com momento resistente do patim e do boleto, respectivamente.

A partir do valor da perda em área do boleto, medida em campo com o perfilógrafo, podem ser calculados com estas equações os momentos de inércia e os momentos resistentes, permitindo que se procedam os cálculos das tensões para verificar as condições da linha.

4.4 Uma análise estatística dos desgastes

O perfilógrafo utilizado para as medições em campo deste estudo fornece, como foi visto no item 3.3, a perda em área do boleto e os desgastes sofridos pelo trilho. Estes desgastes são as perdas em milímetros de metal medidas vertical e horizontalmente.

Os desgastes vertical e horizontal sofridos pelos 212 perfis analisados das linhas da CPTM foram medidos juntamente com as perdas em área dos boletos, e com estas medidas foi elaborada uma análise estatística do desgaste. Os dados medidos dos perfis 1 a 34 são apresentados na tabela 4.12. Os demais perfis são mostrados nas tabelas B.1 a B.5 do anexo B.

Tabela 4.12 – Desgastes

Perfil	Perda boleto	Desgaste Vertical (mm)	Desgaste Horizontal (mm)
1	0,07	2,90	0,18
2	0,05	2,54	-0,59
3	0,05	2,57	-0,60
4	0,04	2,01	-0,56
5	0,08	2,89	2,02
6	0,05	1,56	1,10
7	0,04	1,73	-0,98
8	0,07	3,99	-4,69
9	0,03	1,24	5,30
10	0,05	-0,24	6,47
11	0,09	5,57	-4,11
12	0	-0,83	-0,23
13	0,03	1,90	-5,40
14	0	-0,69	-0,52
15	0,03	0,68	-0,66
16	0	-0,04	-2,50
17	0,01	-0,05	-0,28
18	0	-0,42	-0,19
19	0,07	3,35	0,54
20	0,04	2,38	-0,56
21	0,02	1,52	-0,57
22	0,05	2,66	0,90
23	0,04	1,09	4,58
24	0,08	4,33	-8,14
25	0,09	3,03	4,96
26	0,12	1,49	10,28
27	0,05	1,80	5,32
28	0,04	0,84	5,72
29	0,07	3,93	-0,70
30	0,14	5,86	6,53
31	0,1	4,45	-0,58
32	0,08	3,87	-0,81
33	0,06	3,29	-0,40
34	0,05	1,84	3,48

As análises estatísticas do desgaste foram feitas através de histogramas. Os dados para construção do histograma para o desgaste vertical da figura 4.26 são apresentados na tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Histograma desgaste vertical

Bloco- Desgaste (mm)	Frequência	%	% cumulativo
$\leq -3,35$	1	0,47	0,47
-3,349 – -1,96	0	0,00	0,47
-1,959 – -0,58	5	2,36	2,83
-0,579 – 0,81	35	16,51	19,34
0,811 – 2,19	62	29,24	48,58
2,191 – 3,58	49	23,12	71,7
3,581 – 4,96	36	16,98	88,68
4,961 – 6,35	15	7,07	95,75
6,351 – 7,74	5	2,36	98,11
7,741 – 9,12	2	0,95	99,06
9,121 – 10,51	0	0,00	99,06
10,511 – 11,89	0	0,00	99,06
11,891 – 13,28	1	0,47	99,53
13,281 – 14,66	0	0,00	99,53
>14,66	1	0,47	100,00
Total	212	100	

Na tabela 4.13 é mostrada a frequência com que ocorrem os desgastes nos intervalos descritos pelos blocos. Observa-se pela figura 4.26 que os desgastes verticais mais frequentes estão entre 2,19 e 3,58 milímetros. Os desgastes abaixo de 4,96 milímetros atingem 88,68% dos perfis e somente 0,94% dos perfis sofrem desgastes verticais maiores que 10 milímetros.

O histograma para o desgaste horizontal é apresentado na figura 4.27 e os dados para sua construção estão reunidos na tabela 4.14. A tabela 4.14 mostra a frequência com que ocorrem os desgastes descritos pelos blocos.

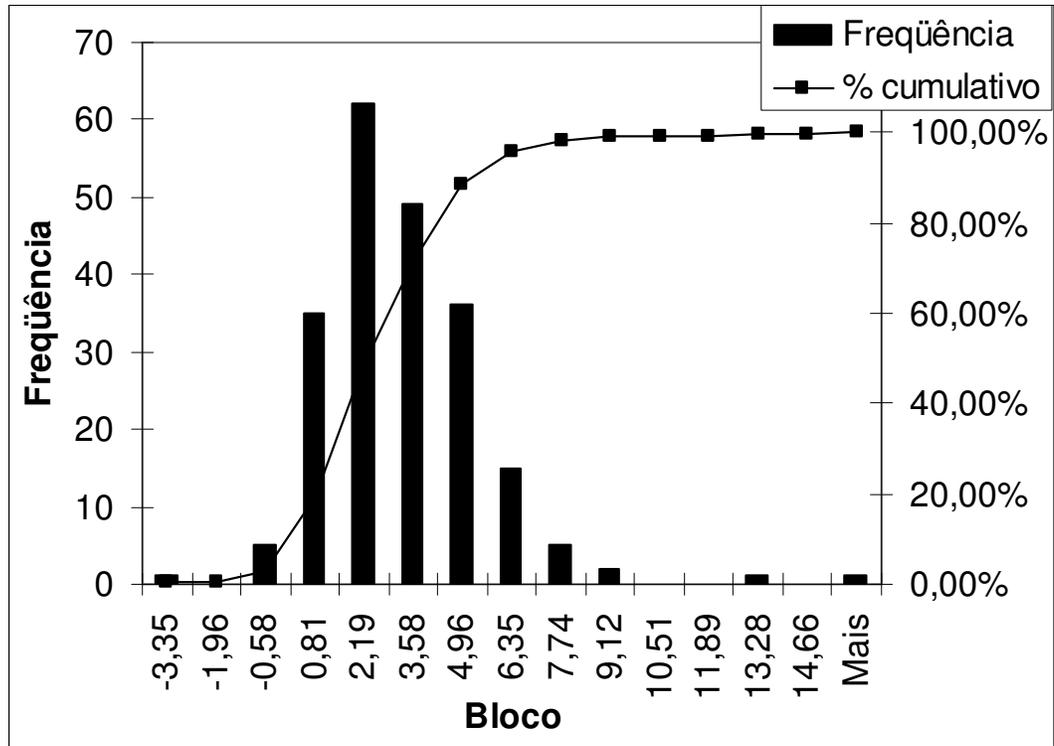


Figura 4.26 – Histograma desgaste vertical

Tabela 4.14 – Histograma desgaste horizontal

Bloco – Desgaste (mm)	Frequência	%	% cumulativo
≤ -11,11	1	0,47	0,47
-11,109 – -8,46	0	0,00	0,47
-8,459 – -5,81	3	1,42	1,89
-5,809 – -3,16	8	3,77	5,66
-3,159 – -0,51	30	14,15	19,81
-0,509 – 2,14	59	27,83	47,64
2,141 – 4,79	12	5,66	53,30
4,791 – 7,45	20	9,44	62,74
7,451 – 10,10	17	8,01	70,75
10,101 – 12,75	22	10,38	81,13
12,751 – 15,40	19	8,96	90,09
15,401 – 18,05	11	5,19	95,28
18,051 – 20,70	5	2,36	97,64
20,701 – 23,35	3	1,42	99,06
>23,35	2	0,94	100,00
Total	212	100	

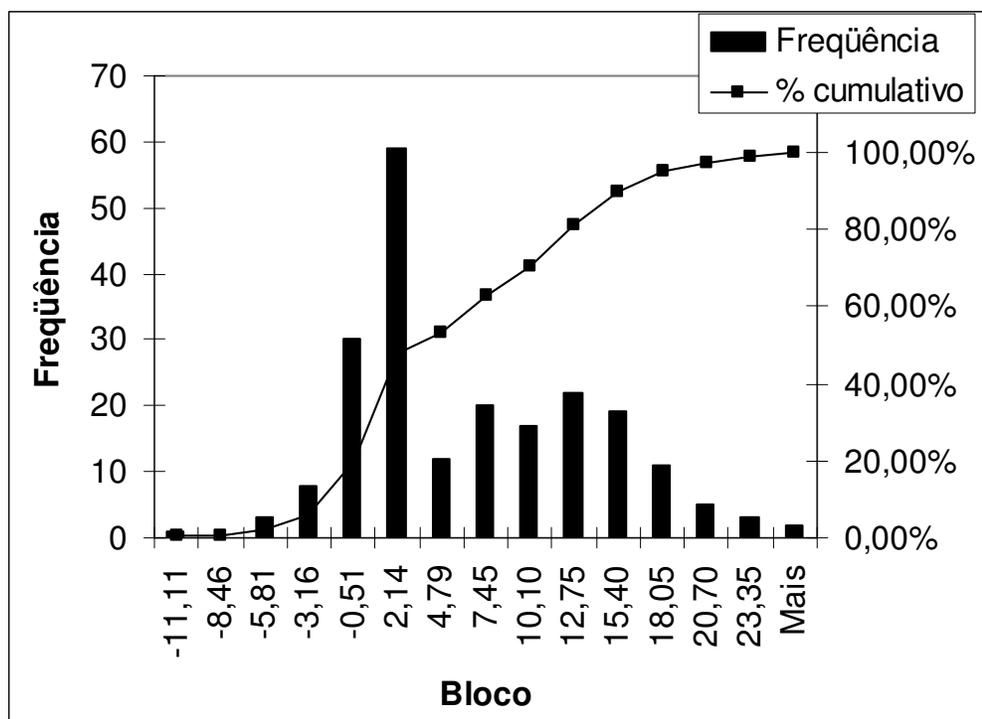


Figura 4.27 – Histograma desgaste horizontal

Observa-se pela figura 4.27 que os desgastes horizontais entre $-0,509$ e $2,14$ milímetros estão em maior frequência. Os desgastes horizontais de até $12,75$ milímetros representam $81,13\%$ dos perfis analisados e $9,91\%$ dos perfis apresentam desgaste horizontal maior que $15,40$ milímetros.

Os histogramas fornecem uma visão isolada da ocorrência dos desgastes vertical e horizontal, pois mostram apenas a forma de distribuição destes. Para uma análise mais apurada da situação do desgaste nas amostras estudadas, é necessário considerar a atuação conjunta dos desgastes horizontal e vertical. Como estes desgastes resultam na perda em área do boleto, foi feito o histograma, mostrado na figura 4.28, a partir da tabela 4.15, para analisar as condições das amostras estudadas.

Tabela 4.15 – Histograma perda em área do boleto

Bloco - Perda boleto	Frequência	%	% cumulativo
≤ 0,00	11	5,19	5,19
0,001 – 0,03	21	9,90	15,09
0,031 – 0,06	42	19,82	34,91
0,061 – 0,09	38	17,92	52,83
0,091 – 0,129	20	9,43	62,26
0,13 – 0,159	15	7,08	69,34
0,16 – 0,189	25	11,79	81,13
0,19 – 0,22	13	6,13	87,26
0,221 – 0,25	11	5,19	92,45
0,251 – 0,28	9	4,25	96,70
0,281 – 0,31	1	0,47	97,17
0,311 – 0,35	3	1,41	98,58
0,351 – 0,38	0	0,00	98,58
0,381 – 0,41	1	0,48	99,06
>0,41	2	0,94	100,00
Total	212	100	

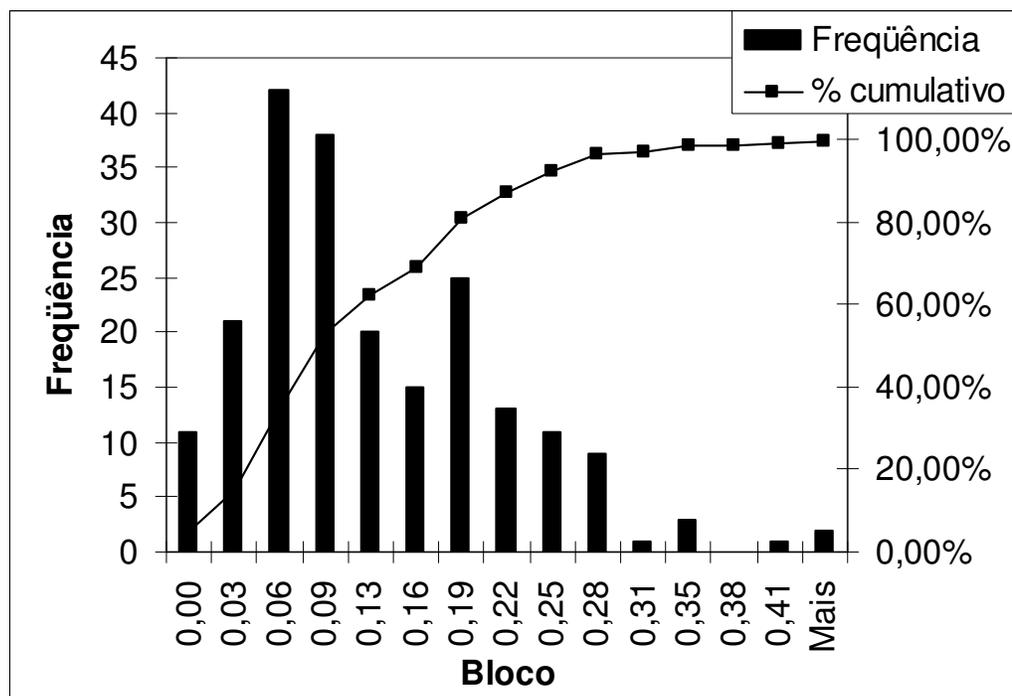


Figura 4.28 – Histograma perda em área do boleto

Pela figura 4.28 observa-se que a perda em área do boleto entre 3,1 e 6% apresenta a maior frequência. Pode-se observar que 92,45% dos perfis têm perda menor ou igual a 25% em área do perfil e 7,55% dos 212 perfis analisados têm perda maior que 25%. Parte desses perfis, 8,96%, teriam que ser substituídos tomando-se como referência o limite de 25% em área do perfil, o que representaria 19 amostras, que são os seguintes perfis: 87, 126, 127, 129, 134, 136, 145, 151, 158, 170, 178, 181, 185, 203, 204, 206, 209, 210 e 211.

Procedeu-se ainda a análise com base nos desgastes verticais e horizontais sofridos pelos perfis amostrados, segundo os limites definidos pelos autores citados no item 2.4.

Segundo o limite estabelecido por Brina (2) para o desgaste vertical, os perfis 124 e 125 deveriam ser substituídos, pois atingem o limite de desgaste. Estes dois perfis têm perda em área do boleto maior que 25%. Os demais 17 perfis que apresentam perda maior que 25% não precisariam ser substituídos, segundo esse critério.

Pelo critério da RFFSA (23 apud 4), os perfis 36, 87, 101, 133, 136, 145, 160, 191, 195, 200, 202, 204, 205 e 209 apresentam desgaste máximo total, em um intervalo entre 10 e 12 milímetros e os perfis 99, 117, 119, 127, 130, 134, 174, 178, 181, 185, 206, 207 e 210 sofreram desgaste máximo total entre mais de 12 até 15 milímetros. O que determina se estes doze perfis ainda podem ser utilizados é a tonelagem bruta anual transportada na linha. Os perfis 43, 124, 125, 203 e 211 apresentam desgaste total máximo superior a 15 milímetros e não poderiam ser utilizados em nenhuma linha, segundo os critérios da RFFSA. Destes perfis, apenas o perfil 43 apresenta perda menor que 25% em área do boleto. Os perfis 151, 158 e 170, embora apresentem desgaste maior que 25% de perda em área do boleto, não estão comprometidos, segundo o critério da RFFSA (23 apud 4).

Verificando os limites de desgaste estabelecidos pela AREMA (24), conclui-se que 126 perfis, ou seja, 59,43% dos perfis atingem os limites de desgaste vertical ou horizontal, ou ainda ambos fixados para as vias principais; dez perfis atingem os limites para ramais principais, ou seja, 4,72%; nove perfis atingem os limites para ramais secundários, o que representa 4,25% do total, e três perfis atingem os limites de desgaste estabelecidos para o pátio, o que significa 1,41% dos perfis. Somente 46,7% dos perfis analisados não atingem nenhum dos limites de desgaste e

poderiam ser utilizados nas vias principais. Todos os perfis que podem ser utilizados em vias principais apresentam perda abaixo de 25%, porém nem todos os perfis, que não podem ser utilizados segundo este critério, apresentam perda maior que 25%.

Analisando os desgastes, segundo os critérios da CPR (25 apud 24), através da figura 2.7 do item 2.4, conclui-se que 10 perfis estão na zona de troca, 26 na zona de inversão de lado, 14 estão além da linha A, que prevê a substituição de trilhos curtos e antigos, 10 estão além da linha B, que prevê a substituição de trilhos longos e soldados, e 8 perfis estão além da linha C e devem ser sucateados. Destes 8 perfis que devem ser sucateados, 2 não apresentam perda maior que 25%, que são os perfis 43 e 207. Dos perfis que estão na zona de troca, somente em dois a perda atinge os 25%.

4.5 Análise de tensões

No item 4.3 foram definidas as equações 4.9, 4.10 e 4.11 que relacionam a perda em área do boleto com o momento de inércia, com o momento resistente do patim e com o momento resistente do boleto, respectivamente. A partir destas equações foram calculados os momentos para perdas variando de 0 a 44%, que corresponde ao maior valor de desgaste encontrado entre os perfis da CPTM, conforme a tabela 4.16.

Estes valores são válidos para as condições encontradas nas linhas da CPTM, onde foram feitas as medições. Com base nisso, foi feita a análise das tensões a que perfis com estas perdas estariam submetidos, buscando encontrar qual a máxima carga que a linha suporta, fixando a tensão máxima como a tensão admissível de 1.500 kgf/cm^2 , assim definida por Brina (2).

Tabela 4.16 – Momentos de inércia e resistentes

Perda (%)	Perda	I (cm ⁴)	Wp (cm ³)	Wb (cm ³)
0	0	2730,47	360,00	295,40
2	0,02	2695,68	357,35	291,42
4	0,04	2660,67	354,94	287,28
6	0,06	2625,43	352,71	282,99
8	0,08	2589,96	350,65	278,59
10	0,1	2554,28	348,73	274,10
12	0,12	2518,36	346,90	269,54
14	0,14	2482,23	345,13	264,93
16	0,16	2445,87	343,40	260,30
18	0,18	2409,28	341,68	255,68
20	0,2	2372,47	339,92	251,08
22	0,22	2335,44	338,10	246,54
24	0,24	2298,18	336,19	242,07
25	0,25	2279,47	335,18	239,87
26	0,26	2260,70	334,14	237,70
28	0,28	2222,99	331,94	233,46
30	0,3	2185,06	329,55	229,36
32	0,32	2146,90	326,94	225,44
34	0,34	2108,52	324,06	221,71
36	0,36	2069,92	320,90	218,20
38	0,38	2031,09	317,42	214,93
40	0,4	1992,03	313,59	211,93
42	0,42	1952,76	309,37	209,23
44	0,44	1913,25	304,74	206,84

Para o cálculo do momento fletor, foi utilizado o método de Zimmermann, descrito no item 2.8.

Para o cálculo do comprimento elástico da linha elástica (L), conforme equação 2.10 explicitada no item 2.8, foi utilizado um módulo de elasticidade do trilho de 2.100.000 kg/cm², uma largura de apoio longitudinal de 46 cm, um coeficiente de lastro variando em 2, 3, 5, 8, 10 e 13 kg/cm³. Os coeficientes de lastro de 2 e 3 kg/cm³ representam uma infra-estrutura em más condições. Os coeficientes de 5 e 8 kg/cm³ representam uma infra-estrutura em boas condições e os coeficientes de 10 e 13 kg/cm³ representam uma infra-estrutura em excelentes condições. Os valores do comprimento elástico da linha elástica (L) são apresentados na tabela 4.17.

Para o cálculo do coeficiente μ , considerou-se a posição de maior solicitação das cargas. Esta solicitação acontece posicionando-se a carga 1 sobre o dormente, onde x/L é 0 e μ atinge seu valor máximo igual a 1 e considerando a influência da carga 2, que atua a uma distância de 200 centímetros da carga 1, produzindo alívio ou sobrecarga no dormente. Os valores dos coeficientes encontrados para cada L encontram-se na tabela 4.18.

Fixando a tensão máxima no boleto como 1.500 kgf/cm^2 , encontraram-se os valores dos momentos fletores, conforme a equação 2.37 descrita no item 2.10. Os valores encontrados são apresentados na tabela 4.19. A tensão no patim é menor que 1.500 kgf/cm^2 , pois o momento resistente do patim é maior que o momento resistente do boleto, e as variáveis tensão e momento resistente são inversamente proporcionais na equação 2.37 do item 2.10, que define a tensão em função do momento fletor e do momento resistente.

A carga estática considerada foi o trem tipo TB-360, segundo a norma NBR-7189 (69), que define como 360 kN, ou seja, 36.000 kg a carga por eixo, e como 2 metros a distância entre as cargas 1 e 2.

A carga dinâmica foi calculada pelas fórmulas 2.3 a 2.8, propostas por Eisenmann (27), apresentadas no item 2.7, considerando um fator de risco de 99,7% e uma velocidade menor que 60 km/h. Encontrou-se o valor de 34,2 t para a carga máxima, considerando-se a infra-estrutura em más condições, 28,8 t, para a infra-estrutura em boas condições e o valor de 23,4 t para a carga considerando a infra-estrutura em excelentes condições.

Tabela 4.17 – Comprimento elástico da linha elástica

Perda	L (cm)					
	c = 2 kg/cm ³	c = 3 kg/cm ³	c = 5 kg/cm ³	c = 8 kg/cm ³	c = 10 kg/cm ³	c = 13 kg/cm ³
0,00	125,66	113,54	99,93	88,85	84,03	78,70
0,02	125,25	113,18	99,61	88,57	83,76	78,44
0,04	124,84	112,81	99,29	88,28	83,49	78,19
0,06	124,43	112,43	98,96	87,98	83,21	77,93
0,08	124,01	112,05	98,62	87,69	82,93	77,66
0,10	123,58	111,66	98,28	87,38	82,64	77,39
0,12	123,14	111,27	97,93	87,07	82,35	77,12
0,14	122,70	110,87	97,58	86,76	82,05	76,84
0,16	122,25	110,46	97,22	86,44	81,75	76,56
0,18	121,79	110,05	96,85	86,12	81,44	76,27
0,20	121,32	109,62	96,48	85,78	81,13	75,98
0,22	120,84	109,19	96,10	85,45	80,81	75,68
0,24	120,36	108,75	95,72	85,10	80,49	75,38
0,25	120,11	108,53	95,52	84,93	80,32	75,22
0,26	119,86	108,31	95,32	84,76	80,16	75,07
0,28	119,36	107,85	94,92	84,40	79,82	74,75
0,30	118,85	107,39	94,52	84,04	79,48	74,43
0,32	118,32	106,92	94,10	83,67	79,13	74,11
0,34	117,79	106,44	93,68	83,29	78,77	73,77
0,36	117,25	105,95	93,25	82,91	78,41	73,43
0,38	116,70	105,45	92,80	82,52	78,04	73,08
0,40	116,13	104,94	92,36	82,12	77,66	72,73
0,42	115,55	104,41	91,90	81,71	77,28	72,37
0,44	114,97	103,88	91,43	81,29	76,88	72,00

Tabela 4.18 – Coeficientes μ

Perda	μ					
	c = 2 kg/cm ³	c = 3 kg/cm ³	c = 5 kg/cm ³	c = 8 kg/cm ³	c = 10 kg/cm ³	c = 13 kg/cm ³
0,00	0,79	0,80	0,82	0,85	0,87	0,89
0,02	0,79	0,80	0,82	0,85	0,87	0,89
0,04	0,79	0,80	0,82	0,85	0,87	0,89
0,06	0,79	0,80	0,82	0,85	0,87	0,89
0,08	0,79	0,80	0,82	0,86	0,87	0,90
0,10	0,79	0,80	0,83	0,86	0,87	0,90
0,12	0,79	0,80	0,83	0,86	0,88	0,90
0,14	0,79	0,80	0,83	0,86	0,90	0,90
0,16	0,79	0,80	0,83	0,86	0,90	0,90
0,18	0,79	0,80	0,83	0,86	0,90	0,90
0,20	0,79	0,80	0,83	0,86	0,88	0,90
0,22	0,79	0,80	0,83	0,86	0,88	0,90
0,24	0,79	0,80	0,83	0,87	0,88	0,90
0,25	0,79	0,80	0,83	0,87	0,88	0,91
0,26	0,80	0,81	0,83	0,87	0,89	0,91
0,28	0,79	0,81	0,83	0,87	0,89	0,91
0,30	0,79	0,81	0,83	0,87	0,89	0,91
0,32	0,80	0,81	0,84	0,87	0,89	0,91
0,34	0,80	0,81	0,84	0,87	0,89	0,91
0,36	0,80	0,81	0,84	0,87	0,89	0,91
0,38	0,80	0,81	0,84	0,87	0,89	0,92
0,40	0,80	0,81	0,84	0,88	0,90	0,92
0,42	0,80	0,81	0,84	0,88	0,90	0,92
0,44	0,80	0,81	0,84	0,88	0,90	0,92

Tabela 4.19 – Momentos fletores

Perda	M (kgf.cm)	σ_{patim} (kgf/cm ²)
0,00	443100,00	1230,83
0,02	437132,10	1223,25
0,04	430917,05	1214,07
0,06	424490,91	1203,50
0,08	417889,75	1191,74
0,10	411149,66	1179,01
0,12	404306,68	1165,50
0,14	397396,90	1151,43
0,16	390456,39	1137,02
0,18	383521,21	1122,47
0,20	376627,44	1107,99
0,22	369811,14	1093,79
0,24	363108,39	1080,08
0,25	359810,86	1073,48
0,26	356555,25	1067,07
0,28	350187,79	1054,96
0,30	344042,09	1043,97
0,32	338154,21	1034,31
0,34	332560,22	1026,22
0,36	327296,20	1019,92
0,38	322398,21	1015,67
0,40	317902,32	1013,75
0,42	313844,61	1014,45
0,44	310261,13	1018,12

Observando-se a tabela 4.19, constata-se que a tensão no patim é menor que 1500 kgf/cm², conforme já foi descrito anteriormente.

Com os valores dos momentos encontrados, procedeu-se o cálculo das cargas dinâmicas admissíveis, conforme a equação 2.15 do item 2.8. Os valores são apresentados na tabela 4.20. Com as cargas dinâmicas, foram calculadas as máximas cargas estáticas admissíveis por eixo, pelas fórmulas 2.3 a 2.8 propostas por Eisenmann (27), apresentadas no item 2.7, considerando um fator de risco de 99,7% e uma velocidade menor que 60 km/h. Os valores encontram-se na tabela 4.21.

Na figura 4.29, é mostrada a variação entre a carga estática máxima por eixo e a perda em área do boleto para cada coeficiente de lastro considerado. Estes valores de carga correspondem à máxima carga que resulta na tensão admissível, fixada por Brina (2) em 1.500 kgf/cm^2 .

Os valores encontrados referem-se ao local onde foram feitas as medições, sendo válidos especificamente para esta linha.

Tabela 4.20 – Cargas dinâmicas

Perda	Q (kg)					
	c = 2 kg/cm ³	c = 3 kg/cm ³	c = 5 kg/cm ³	c = 8 kg/cm ³	c = 10 kg/cm ³	c = 13 kg/cm ³
0,00	17800,84	19536,41	21613,89	23418,38	24268,46	25297,14
0,02	17619,48	19320,17	21360,28	23141,29	23981,50	25000,06
0,04	17425,83	19107,84	21125,52	22851,60	23681,48	24689,30
0,06	17216,76	18871,10	20849,77	22585,98	23406,21	24366,84
0,08	17006,75	18640,91	20565,71	22276,06	23085,48	24034,67
0,10	16784,24	18389,73	20275,04	21959,06	22757,40	23729,18
0,12	16563,42	18133,75	20008,29	21636,83	22423,89	23383,05
0,14	16333,09	17888,36	19709,11	21310,76	22014,61	23033,23
0,16	16101,06	17621,99	19408,52	21015,96	21710,07	22683,28
0,18	15874,78	17355,73	19108,29	20688,36	21404,96	22333,70
0,20	15643,63	17109,49	18837,18	20363,15	21074,69	21986,56
0,22	15415,22	16848,01	18542,53	20042,27	20774,82	21643,96
0,24	15196,80	16591,54	18253,63	19727,68	20449,59	21308,02
0,25	15083,91	16474,50	18124,88	19588,52	20274,79	21128,75
0,26	14927,62	16341,76	17972,32	19421,37	20102,66	20980,90
0,28	14767,28	16117,56	17698,74	19125,34	19797,78	20636,53
0,30	14570,68	15886,02	17447,03	18841,62	19505,59	20334,02
0,32	14379,10	15666,37	17199,69	18572,27	19228,24	20046,90
0,34	14199,79	15460,38	16966,84	18319,39	18967,89	19778,75
0,36	14028,80	15269,87	16750,47	18085,31	18726,74	19530,53
0,38	13884,43	15096,69	16552,57	17871,98	18507,05	19279,70
0,40	13746,72	14939,23	16375,18	17654,79	18284,52	19078,75
0,42	13628,38	14803,00	16220,38	17489,92	18050,52	18904,89
0,44	13531,26	14689,94	16090,26	17352,51	17973,77	18736,57

Tabela 4.21 – Cargas estáticas por eixo

Perda	Qe (kg)					
	c = 2 kg/cm ³	c = 3 kg/cm ³	c = 5 kg/cm ³	c = 8 kg/cm ³	c = 10 kg/cm ³	c = 13 kg/cm ³
0,00	18737,73	20564,64	27017,37	29272,98	37336,10	38918,68
0,02	18546,82	20337,03	26700,35	28926,62	36894,62	38461,63
0,04	18342,98	20113,51	26406,90	28564,50	36433,05	37983,53
0,06	18122,91	19864,32	26062,21	28232,48	36009,56	37487,44
0,08	17901,84	19622,01	25707,13	27845,08	35516,13	36976,41
0,10	17667,62	19357,61	25343,80	27448,82	35011,38	36506,44
0,12	17435,18	19088,16	25010,36	27046,04	34498,29	35973,92
0,14	17192,73	18829,85	24636,39	26638,46	33868,63	35435,74
0,16	16948,48	18549,46	24260,65	26269,95	33400,11	34897,35
0,18	16710,29	18269,19	23885,36	25860,45	32930,71	34359,53
0,20	16466,98	18009,99	23546,48	25453,94	32422,59	33825,47
0,22	16226,55	17734,74	23178,17	25052,84	31961,27	33298,40
0,24	15996,63	17464,78	22817,04	24659,60	31460,91	32781,57
0,25	15877,80	17341,58	22656,09	24485,66	31191,98	32505,76
0,26	15713,28	17201,85	22465,40	24276,71	30927,17	32278,30
0,28	15544,50	16965,85	22123,43	23906,67	30458,12	31748,50
0,30	15337,55	16722,13	21808,79	23552,02	30008,61	31283,10
0,32	15135,89	16490,91	21499,61	23215,34	29581,91	30841,38
0,34	14947,15	16274,08	21208,55	22899,24	29181,37	30428,84
0,36	14767,15	16073,55	20938,09	22606,63	28810,37	30046,97
0,38	14615,19	15891,25	20690,71	22339,97	28472,39	29661,08
0,40	14470,23	15725,51	20468,98	22068,49	28130,03	29351,92
0,42	14345,66	15582,10	20275,47	21862,39	27770,03	29084,45
0,44	14243,43	15463,10	20112,82	21690,63	27651,95	28825,50

Cargas estáticas máximas por eixo

 De 14 a 15 t	 De 15 a 16 t	 De 16 a 17 t	 De 17 a 18 t
 De 18 a 19 t	 De 19 a 20 t	 De 20 a 21 t	 De 21 a 22 t
 De 22 a 23 t	 De 23 a 24 t	 De 24 a 25 t	 De 25 a 26 t
 De 26 a 27 t	 De 27 a 28 t	 De 28 a 29 t	 De 29 a 30 t

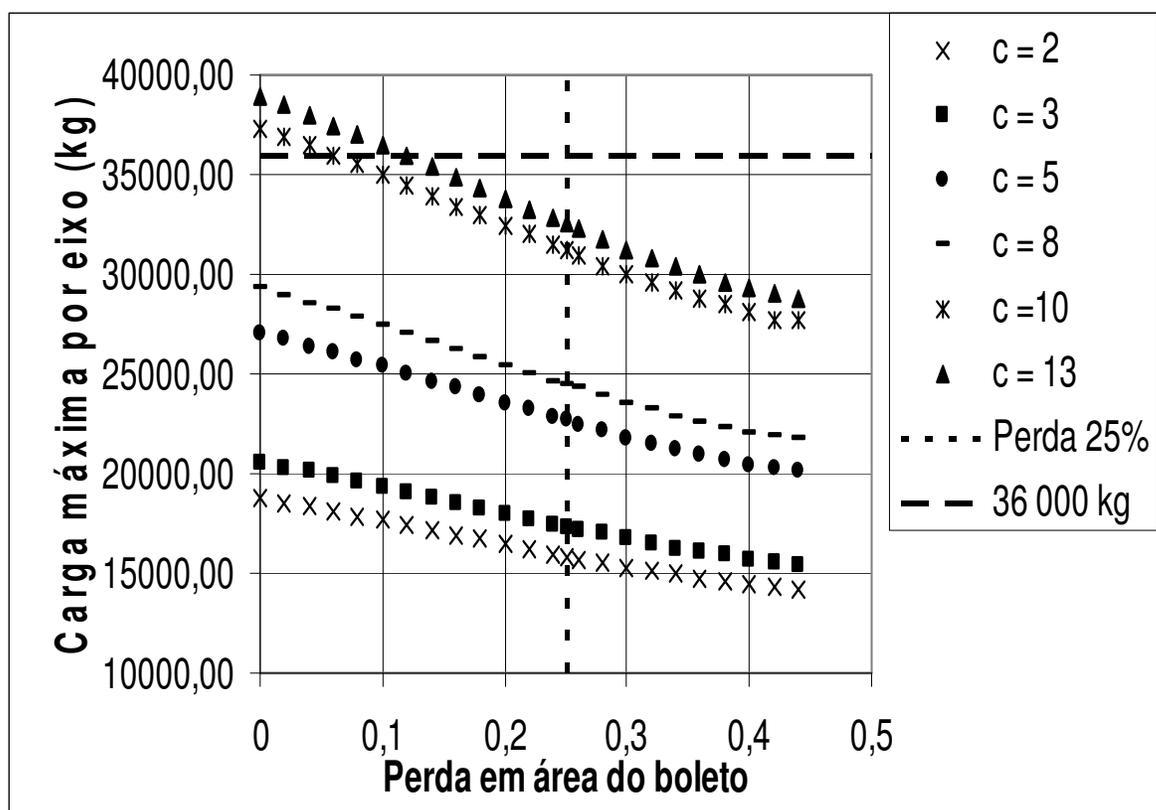


Figura 4.29 - Variação entre a carga estática por eixo e a perda em área do boleto

Como se pode observar pela tabela 4.21 e pela figura 4.29, considerando a infraestrutura ruim, ou seja, com coeficiente de lastro igual a 2 e 3 kg/cm³, a máxima carga por eixo que poderia solicitar o trilho, sem que a tensão atuante superasse a tensão admissível, seria de 18,74 t e 20,56 t, respectivamente, para o trilho novo, ou seja, com perda igual a 0%. Com uma perda de 25%, a carga máxima por eixo poderia ser de 15,88 t, para coeficiente de lastro 2 e 17,34 t, para coeficiente 3, sendo que estas cargas cairiam para 14,24 t e 15,46 t com uma perda de 44% em área do boleto, considerando coeficiente de 2 e 3 kg/cm³, respectivamente.

Observando a tabela 4.21 para infra-estrutura em boas condições, ou seja, com coeficientes de lastro iguais a 5 e 8 kg/cm³, pode-se concluir que a carga máxima para o trilho novo não deveria exceder 27,02 t e 29,27 t, respectivamente, sendo que estes valores cairiam para 22,66 t e 24,49 t com perda de 25% em área do boleto e para 20,11 t e 21,69 t, com uma perda de 44%. Sendo a infra-estrutura excelente, a máxima carga por eixo que resulta numa tensão admissível de até 1.500 kgf/cm² para o trilho novo é de 37,34 t e 38,92 para coeficientes de lastro de 10 e 13 kg/cm³, respectivamente. Ocorrendo perda de 25% em área do boleto, esta carga passa a ser de 31,19 t e 32,51 t para coeficiente 10 e 13 kg/cm³, respectivamente, e com perda de 44% em área do boleto, a máxima carga para um coeficiente de 10 kg/cm³ é de 27,65 t e para um coeficiente de 13 kg/cm³, 28,83 t.

Lembrando que a carga estática por eixo definida pela NBR 7189 (69) é de 36 t, conclui-se que esta carga só poderia ser suportada com segurança numa estrutura excelente, com coeficiente de lastro de 10 kg/cm³, onde o trilho sofresse até 6% de perda em área do boleto e numa estrutura com coeficiente de lastro de 13 kg/cm³, sendo a perda do boleto de até 10% em área. Conclui-se assim que o valor de 25% de perda em área do boleto não está relacionado com o limite de tensão estabelecido para a linha, já que, fixando esta tensão, a perda de 25% resultou em cargas máximas muito abaixo da carga estabelecida pela norma.

4.6 Avaliação dos resultados

Apresenta-se a seguir uma exposição dos resultados encontrados, procedendo-se uma análise mais detalhada das conclusões apresentadas.

Os limites estabelecidos por Brina (2) resultaram em perda maior que 25% de área do boleto, sendo de 28% a perda encontrada para o menor limite vertical definido para linhas principais, e de 29% a perda encontrada para o limite de desgaste lateral. Ocorrendo desgaste vertical e lateral simultaneamente, a perda correspondente foi de 45% em área do boleto, portanto

concluiu-se que os critérios adotados por Brina (2) não apresentam proximidade com o valor de 25% de perda em área para o trilho TR-57.

Analisando os limites de desgaste estipulados pela Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) (23 apud 4) concluiu-se que o limite de desgaste vertical representa perda de 22%, portanto, menor que 25% em área do boleto. O trilho deve ser substituído quando o limite de desgaste vertical ou total, que é a soma do desgaste vertical com metade do desgaste horizontal, for atingido. Como o desgaste total é uma combinação dos desgastes vertical e horizontal, e os limites de desgaste horizontal não são definidos pela RFFSA, não se pode estabelecer uma relação entre o desgaste total e o limite de 25% de perda em área do boleto.

Pelos limites de desgaste estabelecidos pela American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA) (24), para trilhos em vias principais, os limites de desgaste resultariam numa perda de 16%, sendo a perda apenas para trilhos em vias principais menor que 25%. Para ramais principais, ramais secundários e para o pátio, as perdas representariam valores muito superiores aos 25% de perda em área do boleto, sendo de 38, 41 e 51%, respectivamente.

De acordo com o gerenciamento do desgaste do trilho TR-57 feito pela Canadian Pacific Railroad (CPR) (25 apud 24), pode se concluir que os limites estabelecidos para trocar o trilho, para inverter o lado do trilho e para substituir trilhos curtos e antigos resultam em perda menor que 25% em área do boleto. Os limites para sucatear o trilho representam perda acima dos 25%.

Estudando o ângulo de descarrilamento proposto por Esveld (38) para o trilho TR-57, concluiu-se que este limite corresponde exatamente à perda de 25% em área do boleto.

Como se pode observar, os diferentes limites estabelecidos por esses autores variam muito e, em geral, não estabelecem relação direta com o valor de 25% de perda em área, limite este adotado para substituição dos trilhos pelo meio ferroviário. Tomando os limites de desgaste estabelecidos por Brina (2) como referência, por exemplo, o trilho deveria ser trocado quando sua perda atingisse 45% de perda em área do boleto, que corresponderia aos limites de desgaste

vertical e lateral. Já pelos critérios da AREMA (24), o trilho com perda de 16% não deveria ser mais utilizado em vias principais, mais poderia ser utilizado em ramais principais até que a perda atingisse 38%.

Analisando as perdas em área dos boletos dos perfis da CPTM utilizados neste estudo, pelos critérios de substituição dos citados autores, vê-se que, segundo Brina (2), dos 19 perfis que apresentam perda maior que 25% em área do boleto, somente dois precisariam ser substituídos. Pelo critério da RFFSA (23 apud 4), três perfis não estão comprometidos, embora apresentem desgaste maior que 25% e um perfil, embora apresente desgaste menor que 25%, precisaria ser substituído. Pelos limites estabelecidos pela CPR (25 apud 24), dos oito perfis que devem ser sucateados, dois não apresentam perda maior que 25% e dos 10 perfis que estão na zona de troca, somente em dois a perda atinge os 25%.

A única relação satisfatória entre o limite de 25% em área do boleto e o limite estabelecido pelos autores é para o ângulo de descarrilamento, porém, como já foi mostrado no item 4.3, esta relação só vale para o trilho TR-57.

Com isso, conclui-se que o limite de 25% de perda em área do boleto adotado pelo meio ferroviário é um valor aleatório, não fundamentado nos limites estabelecidos pelos autores estudados.

A análise feita em campo dos perfis da CPTM resultou nas equações que relacionam as perdas em área dos boletos, medidas diretamente em campo com o perfilógrafo, com os momentos de inércia das seções e os momentos resistentes. As equações mais adequadas encontradas, que apresentaram melhor correlação entre as variáveis, foram as equações 4.9, para o momento de inércia, 4.10, para o momento resistente do patim e 4.11, para o momento resistente do boleto, conforme explicado no item 4.3. Os coeficientes de determinação destas equações foram 0,98, 0,97 e 0,99, respectivamente, indicando que os modelos se enquadraram muito bem às situações analisadas.

Estas equações permitem que se obtenha de forma direta um valor satisfatório para o momento de inércia e os momentos resistentes do perfil do trilho, a partir do valor da perda em

área do boleto medida em campo com o perfilógrafo. Com este dado é possível proceder a análise de tensões da seção para avaliar as condições de uso do trilho e estabelecer seu limite de utilização.

Com as equações encontradas e para as condições da linha onde foram realizadas as medições, procedeu-se a análise de tensões para diversas perdas, e o que se pôde concluir foi que o valor de 25% de perda em área do boleto não pode ser explicado baseado na análise das tensões, ou seja, não se encontrou relação entre a carga máxima por eixo resultante da tensão admissível para a linha com a perda de 25% em área do boleto e a carga estabelecida pela norma.

5 CONCLUSÃO

A proposição deste estudo consistiu em verificar se o limite de desgaste do boleto aceito hoje é adequado à realidade ferroviária e encontrar uma justificativa para este valor. Com este objetivo, realizou-se uma série de simulações de desgaste no trilho TR-57 através de desenhos, utilizando-se do programa AutoCad. Nestas simulações, foram representados os limites de desgaste fixados pelos autores consultados na literatura e medidos quanto estes desgastes representaram em perda em área do boleto, procurando-se estabelecer uma relação entre os limites estabelecidos por esses autores e a perda em área de 25% do boleto, aceita como limite de substituição dos trilhos no meio ferroviário.

Há divergências entre os autores quanto aos limites de desgaste vertical e horizontal estabelecidos para o boleto, mas não se pode afirmar que haja relação direta entre nenhum destes limites e o valor de 25% utilizado como limite no meio ferroviário.

Testando os limites estabelecidos por Brina (2), verificou-se que a substituição do trilho quando este atingisse 25% de perda em área do boleto poderia ser prematura, já que os limites de desgaste vertical e lateral correspondem respectivamente à perda de 28% e 29%. Ocorrendo simultaneamente desgaste vertical e lateral, a perda poderia chegar a 45% de área do boleto.

O limite de desgaste vertical fixado pela Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) (23 apud 4) resultou numa perda de 22% em área do boleto. O limite de desgaste total não pode ser avaliado, já que é uma combinação do desgaste vertical e horizontal e a RFFSA não fixa valores para o desgaste horizontal, assim não se pode estabelecer uma relação entre estes limites e a perda de 25%.

Segundo a American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA) (24), 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) (25 apud 24) 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 (38) 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. Pode-se, ainda, estabelecer uma relação entre o ângulo de descarrilamento e a perda de 25% em área do boleto, mas convém lembrar que esta relação também foi testada para os trilhos TR-45, TR-50 e TR-68 e só se mostrou válida para o trilho TR-57.

Com o intuito de encontrar uma equação que relacionasse a perda em área do perfil, medida em campo diretamente através de um perfilógrafo, com o momento de inércia da seção, foram estudados 250 perfis em uso em linhas da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM). Foram realizadas as medições nos perfis com um perfilógrafo integrado a um computador que fornece a perda em área do boleto e o perfil desgastado num arquivo do tipo *Portable Document Format* (PDF). Os desenhos gerados em PDF foram refeitos em AutoCad, permitindo obter o momento de inércia dos perfis e, com estes dados, encontrou-se a melhor equação para relacionar a perda em área do perfil com o momento de inércia. Além disso, também foram determinadas as equações que relacionam o momento resistente do patim e do boleto com a perda em área do perfil.

A partir da perda em área do boleto medida em campo pode-se, através destas equações, obter o momento de inércia e os momentos resistentes da seção e, assim, proceder a análise de tensões do perfil que possibilitam verificar seu limite de utilização.

Buscando testar se os 25% de perda em área do boleto estavam relacionados com a tensão admissível para a linha, foi feita uma análise das tensões atuantes nos perfis com desgastes simulados. Para isso, consideraram-se as perdas variando de 0 a 44%, que corresponde ao maior valor de desgaste encontrado entre os perfis da CPTM, e com estas perdas, através das equações determinadas, foram calculados os momentos de inércia e resistentes correspondentes. Tendo fixado a tensão admissível, foram calculados os momentos fletores, segundo uma das metodologias de dimensionamento apresentadas, e considerando para as variáveis envolvidas valores correspondentes aos encontrados nos trechos de medição. As cargas dinâmicas foram calculadas a partir dos valores dos momentos fletores e, com base nestas, foram calculadas as cargas estáticas máximas por eixo, que correspondem à tensão admissível pré-fixada. A carga foi então comparada com a carga do trem-tipo, conforme o estabelecido por norma. O que se pôde concluir foi que, com a infra-estrutura ruim e satisfatória, todas as perdas resultariam numa carga máxima menor que a estabelecida por norma, ou seja, a carga da norma não seria suportada pelo trilho. Com a infra-estrutura excelente, a carga estabelecida por norma estaria abaixo da carga máxima, até que o trilho sofresse uma perda de 6% em área do boleto, se o coeficiente do lastro fosse 10 kgf/cm^3 e de até 10% , com coeficiente de 13 kgf/cm^3 . Portanto, o valor de 25% não está associado à tensão admissível para a linha, não sendo também restrição do ponto de vista do dimensionamento do trilho.

Foram ainda apresentados os principais elementos que constituem a via férrea, assim como os processos clássicos para o dimensionamento dos trilhos, estes didaticamente expostos, 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 e nem pela tensão admissível, 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. Também se encontrou uma equação que possibilita a obtenção direta dos momentos de inércia e momentos resistentes, a partir da medição da perda em área do perfil através do perfilógrafo, para a linha A da CPTM, contribuindo para o conhecimento da área.

Considera-se, portanto, que os objetivos propostos neste estudo, que eram avaliar se o limite de desgaste adotado está adequado à realidade ferroviária e encontrar uma equação que relacionasse a perda em área do boleto com o momento de inércia do perfil, foram integralmente atingidos através dos modelos elaborados, e das análises e dos resultados obtidos. Inevitavelmente, a revisão desses critérios possibilitará uma avaliação mais pertinente quanto à substituição ou sucateamento de trilhos, cujas implicações de ordem econômica são evidentes.

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 horizontais 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.

Anexos

Anexo A – Perfis analisados

Neste anexo são apresentadas as tabelas complementares à tabela 4.8 do item 4.3, onde são apresentados os valores para os momentos de inércia, os centros de gravidade e as distâncias às fibras extremas dos perfis 20 a 212.

Tabela A.1 – Perfis analisados

Perfil	% perda	I (mm ⁴)	y inf (mm)	Wp (cm ³)	y sup (mm)	Wb (cm ³)
20	0,04	26719624,62	75,02	356,17	91,75	291,22
21	0,02	27182511,98	75,74	358,89	91,80	296,11
22	0,05	26381518,36	74,44	354,39	92,16	286,27
23	0,04	26754346,62	74,94	357,00	93,31	286,71
24	0,08	26298700,62	74,48	353,12	90,09	291,90
25	0,09	25476288,49	72,91	349,41	93,45	272,61
26	0,12	24686440,68	71,45	345,53	94,33	261,71
27	0,05	26319277,37	74,23	354,57	92,93	283,22
28	0,04	26757619,56	74,92	357,14	93,60	285,87
29	0,07	26107780,30	74,07	352,49	91,91	284,07
30	0,14	24444997,23	71,21	343,28	92,56	264,11
31	0,1	25405001,16	72,94	348,30	91,05	279,02
32	0,08	25950680,65	73,82	351,55	91,29	284,27
33	0,06	26348057,96	74,46	353,86	90,94	289,74
34	0,05	26624524,20	74,83	355,82	92,70	287,20
35	0,07	26423029,51	74,62	354,12	90,74	291,21
36	0,03	27114155,88	75,72	358,10	91,02	297,88
37	0,1	25576270,13	73,25	349,19	91,00	281,05
38	0,06	26634480,89	74,91	355,55	91,15	292,20
39	0,04	26797500,45	75,16	356,53	91,60	292,56
40	0,04	26701361,00	75,00	356,03	91,53	291,73
41	0,04	26896904,55	75,29	357,25	91,52	293,88
42	0,07	26350128,59	74,51	353,64	90,95	289,71
43	0,06	26748212,47	75,12	356,08	92,83	288,14
44	0,03	26920042,83	75,33	357,35	91,51	294,17
45	0,04	26905617,84	75,33	357,18	90,93	295,89
46	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
47	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
48	0,11	24896591,72	71,91	346,20	93,16	267,25
49	0,08	25995418,40	73,94	351,57	90,57	287,02
50	0,04	26736509,92	74,98	356,59	93,03	287,40
51	0,11	25439796,51	72,97	348,64	92,21	275,89
52	0,03	27181812,17	75,70	359,05	92,67	293,31
53	0,04	26862354,74	75,12	357,58	93,14	288,42
54	0,06	26395991,97	74,52	354,22	91,33	289,02
55	0,06	26253046,95	74,31	353,28	90,84	289,01
56	0,04	26537461,39	74,56	355,91	94,12	281,94
57	0,04	26601945,28	74,66	356,29	93,66	284,01
58	0,08	26240321,46	74,33	353,04	91,27	287,50
59	0,08	26189353,85	74,25	352,73	91,02	287,73

Tabela A.2 – Perfis analisados

Perfil	% perda	I (mm ⁴)	y inf (mm)	Wp (cm ³)	y sup (mm)	Wb (cm ³)
60	0,02	27136611,83	75,66	358,67	91,05	298,04
61	0,04	26732450,31	74,85	357,13	93,76	285,13
62	0,06	25648167,54	73,04	351,18	94,67	270,91
63	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
64	0,06	26147134,30	74,12	352,75	91,53	285,65
65	0,07	26213993,03	74,26	353,00	91,00	288,06
66	0,05	26524199,66	74,73	354,92	91,12	291,10
67	0,05	26602815,20	74,85	355,43	91,41	291,02
68	0,07	26076258,54	74,02	352,29	91,47	285,08
69	0,12	24974794,58	72,29	345,47	91,06	274,26
70	0,09	25747114,19	73,58	349,91	90,23	285,35
71	0,09	25935787,28	73,86	351,13	90,00	288,18
72	0,03	26939818,43	75,30	357,79	92,66	290,73
73	0,05	26680882,46	74,91	356,16	92,20	289,37
74	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
75	0,06	26176917,51	74,15	353,04	91,97	284,61
76	0,08	25831188,15	73,63	350,83	91,38	282,69
77	0,11	25293889,91	72,80	347,44	91,17	277,42
78	0,08	25856810,23	73,70	350,84	91,21	283,49
79	0,08	25955622,24	73,84	351,52	91,03	285,14
80	0,08	25908871,68	73,79	351,12	90,89	285,06
81	0,06	26358814,67	74,36	354,50	93,07	283,23
82	0,08	26127122,63	74,14	352,39	90,75	287,91
83	0,09	25529035,10	73,11	349,18	92,57	275,80
84	0,09	25890985,41	73,79	350,89	90,26	286,84
85	0,03	27068437,62	75,48	358,63	92,01	294,21
86	0,03	27073517,55	75,56	358,31	91,74	295,11
87	0,25	22558600,94	68,22	330,67	91,35	246,94
88	0,05	26341919,31	74,31	354,47	93,04	283,12
89	0,03	27023771,28	75,41	358,38	92,58	291,88
90	0,14	24478500,70	71,43	342,71	91,60	267,24
91	0,13	24775026,65	71,75	345,28	92,40	268,14
92	0,12	24976513,93	72,07	346,56	92,62	269,65
93	0,14	24700795,91	71,81	343,98	91,69	269,41
94	0,15	24282495,83	70,96	342,22	93,17	260,62
95	0,06	26428047,52	74,57	354,39	91,35	289,30
96	0,07	25968797,56	73,85	351,64	91,06	285,19
97	0,04	26743854,00	75,05	356,37	91,75	291,49
98	0,06	26369239,51	74,48	354,04	91,14	289,32
99	0,18	22951090,88	68,54	334,88	93,98	244,22

Tabela A.3 – Perfis analisados

Perfil	% perda	I (mm ⁴)	y inf (mm)	Wp (cm ³)	y sup (mm)	Wb (cm ³)
100	0,09	25583450,09	73,04	350,28	92,89	275,41
101	0,1	23566869,21	69,27	340,22	96,52	244,15
102	0,12	24374365,42	70,87	343,95	94,73	257,30
103	0,07	26382327,48	74,53	354,00	90,44	291,72
104	0,05	26688311,70	74,97	355,98	91,22	292,58
105	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
106	0,08	25369022,75	72,68	349,04	93,88	270,24
107	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
108	0,02	27207973,98	75,68	359,50	93,02	292,49
109	0,11	24809498,23	71,75	345,79	93,95	264,08
110	0,03	26121029,87	73,69	354,46	94,94	275,13
111	0,06	25641464,25	72,98	351,35	94,29	271,94
112	0	27304700,00	75,85	360,00	92,43	295,40
113	0,06	26457981,92	74,65	354,41	91,36	289,60
114	0,07	25481014,52	72,74	350,32	94,60	269,37
115	0,09	25739867,53	73,51	350,18	91,86	280,20
116	0,03	26964988,39	75,35	357,84	93,53	288,32
117	0,17	22483200,19	67,61	332,53	95,67	235,00
118	0,09	25859960,58	73,67	351,00	91,90	281,39
119	0,13	23070550,65	68,49	336,86	95,93	240,49
120	0,09	25557087,03	73,17	349,27	91,54	279,19
121	0,03	27296988,87	75,98	359,26	95,47	285,91
122	0,03	27133876,17	75,71	358,40	90,57	299,59
123	0,07	25447677,34	72,77	349,72	94,09	270,46
124	0,44	18459409,00	61,10	302,12	90,31	204,40
125	0,39	19845259,00	63,29	313,56	93,04	213,30
126	0,18	23661991,00	70,03	337,89	91,89	257,50
127	0,26	22562725,00	67,80	332,81	94,01	240,00
128	0,18	23769350,00	70,15	338,82	92,83	256,05
129	0,02	26945966,00	75,20	358,32	93,01	289,71
130	0,24	23113113,00	68,52	337,32	95,08	243,09
131	0,1	25266105,00	72,70	347,53	91,33	276,65
132	0,04	26614575,00	74,76	355,99	92,32	288,29
133	0,24	23057827,00	68,63	335,97	93,54	246,50
134	0,32	21463145,00	65,79	326,22	96,38	222,69
135	0,13	24573419,00	71,61	343,17	90,31	272,10
136	0,29	21868997,00	67,75	322,81	93,92	232,85
137	0,18	23873533,00	70,25	339,84	92,73	257,45
138	0,09	25525435,00	73,05	349,41	91,40	279,27
139	0,1	25148778,00	72,51	346,83	91,48	274,91

Tabela A.4– Perfis analisados

Perfil	% perda	I (mm ⁴)	y inf (mm)	Wp (cm ³)	y sup (mm)	Wb (cm ³)
140	0,16	24337144,00	70,90	343,26	94,41	257,78
141	0,19	23596255,00	69,85	337,80	92,07	256,29
142	0,01	27214588,00	75,67	359,64	92,61	293,86
143	0,21	23342043,00	69,25	337,06	93,73	249,03
144	0,11	25218997,00	72,53	347,72	92,47	272,73
145	0,32	21447044,00	65,85	325,68	95,01	225,73
146	0,05	26364904,00	74,39	354,40	91,75	287,36
147	0,22	22892904,00	68,70	333,25	92,17	248,38
148	0,1	25197320,00	72,58	347,18	91,32	275,92
149	0,11	24952290,00	72,23	345,45	90,75	274,96
150	0,17	24144252,00	70,62	341,90	93,42	258,45
151	0,26	22643721,00	67,96	333,21	95,02	238,30
152	0,02	27015175,00	75,31	358,70	92,87	290,89
153	0,1	25236662,00	72,66	347,31	91,37	276,20
154	0,15	24720139,00	71,51	345,69	94,38	261,92
155	0,15	24567097,00	71,39	344,15	93,71	262,16
156	0,2	23222386,00	69,40	334,61	90,55	256,46
157	0,07	25951243,00	73,70	352,12	92,45	280,71
158	0,26	21980397,00	67,30	326,62	91,45	240,35
159	0,12	24839670,00	71,97	345,15	91,92	270,23
160	0,22	23811212,00	69,59	342,17	98,46	241,84
161	0,18	24361041,00	70,67	344,71	97,61	249,58
162	0,08	25964076,00	73,58	352,87	94,70	274,17
163	0,20	24109135,00	70,14	343,72	97,03	248,47
164	0,24	23233025,00	68,69	338,22	94,94	244,71
165	0,23	23415433,00	68,98	339,45	94,65	247,39
166	0,11	25319240,00	72,48	349,34	95,14	266,13
167	0,15	24800188,00	71,49	346,92	95,69	259,17
168	0,18	24361424,00	70,62	344,98	97,66	249,45
169	0,18	24242493,00	70,52	343,77	95,26	254,49
170	0,27	22948134,00	67,88	338,05	100,40	228,57
171	0,17	24525990,00	70,97	345,61	97,31	252,04
172	0,18	24228751,00	70,58	343,29	94,48	256,44
173	0,16	24648889,00	71,18	346,28	97,10	253,86
174	0,23	23347870,00	68,94	338,67	94,85	246,16
175	0,17	24407711,00	70,88	344,33	94,72	257,68
176	0,20	23926971,00	70,01	341,76	94,93	252,05
177	0,22	23668478,00	69,42	340,93	96,19	246,06
178	0,34	21655249,00	65,65	329,83	97,92	221,15
179	0,14	24848547,00	71,68	346,66	95,17	261,10

Tabela A.5 – Perfis analisados

Perfil	% perda	I (mm ⁴)	y inf (mm)	Wp (cm ³)	y sup (mm)	Wb (cm ³)
180	0,14	24898764,00	71,66	347,46	95,98	259,42
181	0,27	22636068,00	67,72	334,26	95,84	236,19
182	0,18	24146096,00	70,41	342,94	94,72	254,92
183	0,10	25594011,00	72,90	351,08	95,38	268,34
184	0,20	23800113,00	69,94	340,31	95,35	249,61
185	0,26	22879500,00	68,06	336,17	97,22	235,34
186	0,22	23673506,00	69,46	340,82	95,64	247,53
187	0,18	24303939,00	70,61	344,20	96,34	252,27
188	0,18	24157210,00	70,48	342,75	95,64	252,58
189	0,19	24003445,00	70,16	342,11	95,16	252,24
190	0,15	24831943,00	71,56	347,03	96,02	258,61
191	0,23	23412313,00	69,04	339,12	95,48	245,21
192	0,13	25002418,00	71,91	347,67	96,37	259,44
193	0,16	24481018,00	71,02	344,71	94,75	258,37
194	0,16	24480012,00	71,05	344,56	94,98	257,74
195	0,23	23494113,00	69,06	340,18	96,49	243,49
196	0,17	24407304,00	70,91	344,21	94,61	257,98
197	0,16	24522924,00	71,08	345,03	94,77	258,76
198	0,15	24759407,00	71,47	346,42	95,48	259,32
199	0,17	24336236,00	70,81	343,70	94,50	257,53
200	0,21	23415734,00	69,39	337,45	93,95	249,24
201	0,18	24307045,00	70,70	343,81	95,60	254,26
202	0,23	23406727,00	69,50	336,79	92,80	252,23
203	0,41	20080390,00	63,70	315,23	94,20	213,17
204	0,25	23086946,00	69,10	334,11	93,20	247,71
205	0,17	24724583,00	71,70	344,83	94,70	261,08
206	0,28	23141735,00	69,00	335,39	95,40	242,58
207	0,22	23804200,00	70,00	340,06	95,40	249,52
208	0,16	24280850,00	70,80	342,95	93,30	260,24
209	0,25	22820958,00	68,10	335,11	95,30	239,46
210	0,28	22621025,00	67,50	335,13	97,00	233,21
211	0,27	22631757,00	67,60	334,79	96,40	234,77
212	0,07	25791133,00	73,50	350,90	91,20	282,80

Anexo B – Desgastes

Neste anexo são apresentadas as tabelas complementares à tabela 4.12 do item 4.4, onde são apresentados desgastes verticais e horizontais para os perfis 35 a 212.

Tabela B.1 – Desgastes

Perfil	Perda boleto	Desgaste Vertical (mm)	Desgaste Horizontal (mm)
35	0,07	3,56	-3,72
36	0,03	1,66	19,98
37	0,1	4,19	-1,51
38	0,06	3,38	-2,05
39	0,04	2,21	-0,95
40	0,04	1,86	-0,64
41	0,04	1,97	-0,51
42	0,07	3,21	-2,72
43	0,06	4,23	23,82
44	0,03	1,83	0,09
45	0,04	2,48	-2,72
46	0	-0,56	-1,04
47	0	-0,20	-0,20
48	0,11	2,12	6,71
49	0,08	4,36	-3,47
50	0,04	0,73	2,74
51	0,11	2,55	-2,17
52	0,03	0,18	0,43
53	0,04	-0,14	4,59
54	0,06	2,62	-0,20
55	0,06	3,35	-0,35
56	0,04	0,77	6,60
57	0,04	0,08	5,33
58	0,08	3,33	-5,94
59	0,08	3,39	-5,61
60	0,02	1,62	-0,55
61	0,04	0,73	5,69
62	0,06	1,09	9,18
63	0	0,88	-0,47
64	0,06	3,15	-0,31
65	0,07	3,31	-0,48
66	0,05	2,95	-2,74
67	0,05	2,75	-0,94
68	0,07	3,65	-0,16
69	0,12	5,49	-0,03
70	0,09	4,76	-7,34
71	0,09	4,75	-0,40
72	0,03	1,11	1,94
73	0,05	0,97	1,37
74	0	0,05	-0,31
75	0,06	2,63	1,15

Tabela B.2 – Desgastes

Perfil	Perda boleto	Desgaste Vertical (mm)	Desgaste Horizontal (mm)
76	0,08	3,86	-0,31
77	0,11	4,59	0,06
78	0,08	4,08	0,34
79	0,08	4,07	-0,21
80	0,08	3,93	-0,58
81	0,06	2,18	5,62
82	0,08	3,97	-0,35
83	0,09	2,91	1,21
84	0,09	4,72	-4,47
85	0,03	0,58	2,50
86	0,03	0,87	1,82
87	0,25	8,76	3,71
88	0,05	1,55	5,21
89	0,03	1,27	2,65
90	0,14	6,50	2,27
91	0,13	1,91	6,13
92	0,12	2,18	-11,11
93	0,14	5,85	2,70
94	0,15	3,88	7,20
95	0,06	3,12	-0,18
96	0,07	3,34	-0,01
97	0,04	2,14	0,21
98	0,06	2,96	-0,02
99	0,18	6,64	11,91
100	0,09	1,66	6,42
101	0,1	1,86	16,50
102	0,12	2,37	10,68
103	0,07	3,28	-0,41
104	0,05	2,67	-1,68
105	0	-0,34	-0,54
106	0,08	2,21	7,49
107	0	-0,03	-0,34
108	0,02	0,46	3,28
109	0,11	2,38	7,82
110	0,03	0,64	11,53
111	0,06	2,11	7,54
112	0	0,02	-0,40
113	0,06	2,47	-0,16
114	0,07	2,49	11,54
115	0,09	1,32	8,84
116	0,03	0,17	0,99

Tabela B.3 – Desgastes

Perfil	Perda boleto	Desgaste Vertical (mm)	Desgaste Horizontal (mm)
117	0,17	5,10	14,73
118	0,09	3,38	0,05
119	0,13	4,69	16,21
120	0,09	3,87	-0,23
121	0,03	-3,35	14,20
122	0,03	1,82	-0,78
123	0,07	2,33	8,77
124	0,44	16,05	0,24
125	0,39	12,02	9,04
126	0,18	4,99	1,94
127	0,26	7,21	12,10
128	0,18	5,62	6,75
129	0,02	-1,05	1,89
130	0,24	4,18	15,71
131	0,1	4,46	-5,28
132	0,04	0,62	1,19
133	0,24	4,74	11,94
134	0,32	6,19	16,78
135	0,13	4,77	-0,05
136	0,29	6,99	8,94
137	0,18	4,36	6,48
138	0,09	2,96	1,16
139	0,1	0,77	-1,23
140	0,16	2,22	9,05
141	0,19	2,37	4,49
142	0,01	-1,07	1,35
143	0,21	4,66	9,29
144	0,11	1,72	1,70
145	0,32	4,96	13,66
146	0,05	1,29	0,39
147	0,22	6,20	4,65
148	0,1	3,49	0,18
149	0,11	0,76	-0,53
150	0,17	3,41	7,42
151	0,26	2,82	12,19
152	0,02	-1,46	0,98
153	0,1	0,12	-0,05
154	0,15	1,36	9,67
155	0,15	2,36	6,01
156	0,2	6,18	0,27
157	0,07	1,80	1,02

Tabela B.4– Desgastes

Perfil	Perda boleto	Desgaste Vertical (mm)	Desgaste Horizontal (mm)
158	0,26	7,47	0,11
159	0,12	3,70	0,30
160	0,22	2,00	17,00
161	0,18	1,00	16,00
162	0,08	1,00	7,00
163	0,20	2,00	16,00
164	0,24	2,00	16,00
165	0,23	2,00	12,00
166	0,11	0,00	12,00
167	0,15	2,00	11,00
168	0,18	0,00	14,00
169	0,18	2,00	11,00
170	0,27	0,00	19,00
171	0,17	0,00	14,00
172	0,18	4,00	11,00
173	0,16	0,00	13,00
174	0,23	5,00	16,00
175	0,17	1,00	12,00
176	0,20	2,00	13,00
177	0,22	2,00	14,00
178	0,34	4,00	21,00
179	0,14	2,00	10,00
180	0,14	0,00	12,00
181	0,27	6,00	16,00
182	0,18	2,00	13,00
183	0,10	0,00	10,00
184	0,20	3,00	11,00
185	0,26	4,00	19,00
186	0,22	2,00	15,00
187	0,18	1,00	15,00
188	0,18	2,00	12,00
189	0,19	2,00	15,00
190	0,15	0,00	11,00
191	0,23	4,00	15,00
192	0,13	0,00	10,00
193	0,16	2,00	14,00
194	0,16	2,00	12,00
195	0,23	2,00	17,00
196	0,17	2,00	10,00
197	0,16	2,00	11,00
198	0,15	0,00	10,00

Tabela B.5 – Desgastes

Perfil	Perda boleto	Desgaste Vertical (mm)	Desgaste Horizontal (mm)
199	0,17	2,00	12,00
200	0,21	5,00	11,00
201	0,18	2,00	14,00
202	0,23	3,00	15,00
203	0,41	9,00	26,00
204	0,25	4,00	15,00
205	0,17	3,00	15,00
206	0,28	3,00	21,00
207	0,22	4,00	19,00
208	0,16	1,00	10,00
209	0,25	3,00	15,00
210	0,28	4,00	20,00
211	0,27	6,00	21,00
212	0,07	5,00	0,00

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 RIVES, F. O.; PITA, A. L.; PUENTE, M.J.M. **Tratado de ferrocarriles I via**. Madrid: Rueda, 1977.
- 2 BRINA, H. L. **Estradas de ferro**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v.1, 1979.
- 3 STOPATTO, S. **Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1987.
- 4 BATIST, M. 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, 2002, p. 256-266.
- 5 PAIVA, C. E.L. **Superestrutura ferroviária**. 2. ed. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1999.
- 6 SCHRAMM, G. **Técnica e economia na via permanente**. Tradução de Rudy A. Volkmann. Porto Alegre: Emma, 1977. Tradução de Oberbautechnik und Oberbauwirtschaft.
- 7 JUNIOR, W. V.; RODRIGUES, C. M. O. Descarrilamentos de causas não evidentes investigação e prevenção. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MATERIAL RODANTE VIA PERMANENTE E SEUS ACESSÓRIOS, 1996, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro, 1996, p. 305-330.
- 8 MACEDO, C. Bitola da via caminho da modernidade, In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TRANSPORTES METROPOLITANOS SOBRE TRILHOS, 1994, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro, 1994, p. 28-30.
- 9 VILLA E. C. **Inscrição de um veículo ferroviário em curva**, 1993. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- 10 FILHO, F. R.; VILLA, E. Solicitação Atuante nos Frisos das Rodas dos Veículos Metro-Ferrovíarios em Curvas Horizontais. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TRANSPORTES METROPOLITANOS SOBRE TRILHOS, 1994, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro, 1994, p. 470-486.
- 11 TOGNO, F. **Ferrocarriles**. Naucálpan: Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A, 1973.
- 12 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11693**: trilho “Vignole” e acessórios- reaproveitamento. Rio de Janeiro, 1991.
- 13 _____. **NBR 7599**: trilho com defeito. Rio de Janeiro, 1982.

- 14 _____. **NBR 7590**: trilho “Vignole”. Rio de Janeiro, 1991.
- 15 _____. **NBR 7650**: trilho. Rio de Janeiro, 1982.
- 16 SCHRAMM, G. **Via Parmanente**. Curso, agosto de 1973. Campinas, v. 1, 1973, 116f. Notas de Aula (Mimeografado).
- 17 CANNON, D.; PRADIER, H. ERRI gets to grips with rail fatigue. **Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review**. New York, p.49-50, jun. 1995.
- 18 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12320**: trilho “Vignole”. Forma e dimensão. Rio de Janeiro, 1979.
- 19 AMERICAN RAILWAY ENGINEERING ASSOCIATION. **Manual for railway engineering**. Chicago, 1976.
- 20 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12399**: trilho “Vignole” tolerâncias dimensionais. Rio de Janeiro, 1979.
- 21 JUDGE, T. The search for longer rail life. **Railway Age**. New York, mar.2001.
- 22 KRISTAN, J. Investigation of metallurgical fundamentals of rail wear: TTCI studies rail-steel microstructure and micromechanical properties to further rail performance and possibly derive safety benefits. **Railway Track and Structures**. New York, ago. 2004.
- 23 RFFSA. **Norma IVR – 15**: reemprego de trilhos. Rio de Janeiro, 1991.
- 24 BRANCO, J. E. C.; FERREIRA, R. 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, 2002, p. 145-157.
- 25 RONEY, M. D. Maintening optimal whell and rail performance. **Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: whell and rail interface issues, internacional heavy haul association**. Virginia, part 5, 2001, p. 155-156.
- 26 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.
- 27 EISENMANN, J. The Rail as Support and Roadway Theoretical Principles and Practical Examples. In: FASTENRATH, Fritz. (Ed.). **Railroad Track: theory and practice**. Tradução de Walter Grant. New York: Frederick Ungar Publishing CO, 1981, p. 10-79. Versão inglesa de Die Eisenbahnschiene: Theoretische und Praktische do original alemão.
- 28 TIMOSHENKO, S.P. **Resistência dos materiais**. Tradução de José Rodrigues de Carvalho. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, v. 1, 1978.

- 29 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7914**: projeto de lastro para via férrea. Rio de Janeiro, 1990.
- 30 _____. **NBR 12198**: dormente. Rio de Janeiro, 1979.
- 31 _____. **NBR 7511**: dormente de madeira para via férrea. Rio de Janeiro, 1982.
- 32 GUIMARÃES, C. A. **Análise das solicitações dinâmicas na via férrea através da simulação da interação entre o veículo e a via**. 1999. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- 33 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12206**: trilho “Vignole” e acessórios escolha. Rio de Janeiro, 1977.
- 34 RICARDO, O. **Introdução à resistência dos materiais**. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1977.
- 35 BEER, F.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. Tradução de Paulo Prestes Castilho. São Paulo: McGraw-Hill, 1989.
- 36 MAGEL, E. Optimizing wheel, rail profiles. **Railway Track and Structures**. New York, jul. 1999.
- 37 MAGALHÃES, P. C. Contato Roda-Trilho. In: BRANCO, J. E. S. C.; FERREIRA, R. (Ed.). **Tratado de estradas de ferro**. Rio de Janeiro, 2000, p. 80-111.
- 38 ESVELD, C. **Modern railway track**. Tradução de Julie Page. West Germany: Graphics Department of Thyssen Stahl AG, 1989.
- 39 BARBOSA, R. Dinâmica do rodeiro na inscrição de curvas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE OPERAÇÃO, CONDUÇÃO, SEGURANÇA E INTEGRAÇÃO NOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS, 1995, Curitiba. **Anais**. Curitiba, 1995, p. 33-45.
- 40 _____. **Aplicação de sistemas multicorpos na dinâmica de veículos guiados**. 1999. Tese de doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- 41 _____. Ações para a melhoria da qualidade do transporte. **Revista Engenharia.**, nº 546, p. 124-126, 2001.
- 42 MAGALHÃES, P. C. Determinação da causa do descarrilamento de trens em AMV's e prevenção. In: BRANCO, J. E. S. C.; FERREIRA, R. (ed.). **Tratado de estradas de ferro**. Rio de Janeiro, v.2, 2002, p. 428-460.
- 43 VIDON, W.; MAGALHÃES, P.; DANIEL, V.; SONJA, L. **Determinação da causa do descarrilamento de trens e prevenção**. Apostila do curso para capacitação de investigadores plenos, concebido e ministrado pela empresa Technicontrol para várias ferrovias brasileiras, Belo Horizonte, 2002.

- 44 SCHCH, W. Combating rail surface fatigue in Europe by head check grinding. **Rail Engineering International Edition**, p.6-8, num. 1, 2004.
- 45 HIENSCH, M.; WATSON, A. ProRail predicts RCF hotspots. **Railway Gazette Internacional**. New York, p. 38-40, jan. 2004.
- 46 GRASSIE, S., Fatigue failure is often the hidden hazard. **Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review**. New York, p. 29-30, fev. 1997.
- 47 KORPANEC, I.; TOWPIC, K. Investigación ORE sobre mantenimiento de infraestructura ferroviaria. BOLETIN de la ASOCIACION DEL CONGRESO PANAMERICANO DE FERROCARRILES. Buenos Aires, nº 328, p. 115-126, 1993.
- 48 GRASSIE, S. Preventive Grinding Controls RCF Defects. **Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review**. New York, jan. 2001.
- 49 SMULDERS, J. Management and research tackle rolling contact fatigue. **Railway Gazette International**. New York, p. 433-436, jul. 2003.
- 50 KNUTTON, M. Measure, Predict, Prevent. **Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review**. New York, p. 15-19, ago. 2004.
- 51 BRANCO, J. E. S. C. **Dicionário inglês-português de termos ferroviários**. Rio de Janeiro: Logus, 1996.
- 52 SROBA, P.; MAGEL, E.; PRAHL, F. Getting the most from rail grinding. **Railway Track and Structures**. New York, dez. 2003.
- 53 REDE FERROVIÁRIA FEDERAL S.A. **Normas e instruções gerais de via permanente**. Defeitos de trilhos, 1990.
- 54 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7640**: defeitos de trilhos utilizados para via férrea. Rio de Janeiro, 1988.
- 55 JUDGE, T. Measuring up- automated technologies lead to better railroad tracks. **Railway Age**. New York, set. 2001.
- 56 GRASSIE, S.; KALOUSEK, J. Rail corrugation: causes and cures. **Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review**. New York, p. 24-26, jul. 2000.
- 57 PANADES, J.M. El desgaste ondulatorio del carril: um fenómeno complejo por conocer todavía em su totalidad. BOLETIN de la ASOCIACION DEL CONGRESO PANAMERICANO DE FERROCARRILES. Buenos Aires, nº 334, p. 73-99, 1996.
- 58 BIRMANN, F. 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, 1981, p.256-295. Versão inglesa de Die Eisenbahnschiene: Theoretische und Praktische do original alemão.

59 KAEISS, G. 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, 1981, p. 296-314. Versão inglesa de Die Eisenbahnschiene: Theoretische und Praktische do original alemão.

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

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

62 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 ad Structures**. New York, dez. 2004.

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

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

65 TREM esmerilhador realiza trabalho na Linha do Centro. Disponível em <http://www.mrs.com.br/interna.php?nomPagina=noticias/files/detalhes.php?cod_noticia=137&%20IdSecao=8> Acesso em: 24 jul. 2005, 18:21:30.

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

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

68 KOWALTOWSKI, D.; RUSCHEL, R. **Utilizando AutoCAD R. 13**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1997. Notas de Aula (Impresso).

69 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7189**: Cargas móveis para o projeto estrutural de obras ferroviárias. Rio de Janeiro, 1985.