



MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
(Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho, 1792)
SUBDIVISÃO DE CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO
Curso de Especialização em Engenharia de Transporte Ferroviário de Carga

FUNDAMENTOS DO GERENCIAMENTO DO ATRITO

FELIPE OLIVEIRA VIDON

Rio de Janeiro

2012

FUNDAMENTOS DO GERENCIAMENTO DO ATRITO

FELIPE OLIVEIRA VIDON

Trabalho Final de Curso apresentado ao Programa de Especialização em Engenharia de Transporte Ferroviário de Carga, área de concentração: Subdivisão de Cursos de Pós Graduação, do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Transporte Ferroviário de Cargas.

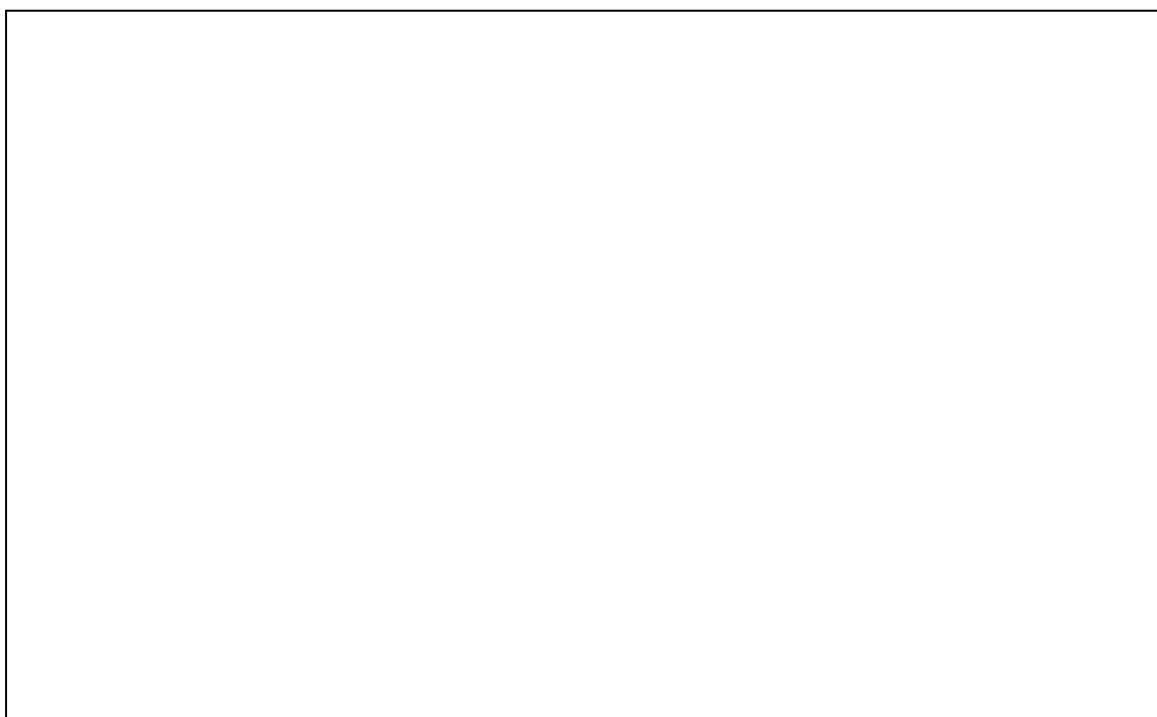
Orientador: Prof. Cel. Luiz Antônio Silveira Lopes,
D.Sc.

Tutor: Walter Vidon Júnior

Rio de Janeiro

2012

Ficha catalográfica elaborada pelos bibliotecários do IME (impressão no verso da folha de rosto)

A large, empty rectangular box with a thin black border, occupying the lower half of the page. It is intended for a catalog card, as indicated by the text above it.

FELIPE OLIVEIRA VIDON

FUNDAMENTOS DO GERENCIAMENTO DO ATRITO

Trabalho Final de Curso apresentado ao Programa de Especialização em Engenharia de Transporte Ferroviário de Carga, área de concentração: Subdivisão de Cursos de Pós Graduação, do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Transporte Ferroviário de Cargas.

Aprovado em 29 de Junho de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Cel. Luiz Antônio Silveira Lopes, D.Sc. (Orientador)

Instituto Militar de Engenharia

Prof. Manuel Mendes

CEPEFER

Dedico este trabalho aos meus pais, a Ana
Luiza e ao Guilherme.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Militar de Engenharia, que me deu a honra e o privilégio de cursar a Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas.

Aos professores Luiz Antônio Silveira Lopes e Manoel Ferreira Mendes, pelo acompanhamento e orientação ao longo do Curso.

A todos os professores do IME, que ao transmitirem os seus conhecimentos, tornaram possível esta monografia.

A MRS Logística pela oportunidade de participar do pioneiro projeto de Gerenciamento de Atrito no Brasil.

Aos amigos da CH.Vidon pelo comprometimento e dedicação no desenvolvimento das atividades de Gerenciamento do Atrito.

A todos os colegas da Especialização.

RESUMO

Esta monografia tem como objetivo apresentar a nova tecnologia de Gerenciamento do Atrito para os sistemas ferroviários.

O Gerenciamento do Atrito consiste em controlar o atrito na interface roda-trilho em níveis ideais para otimizar a operação ferroviária.

Abrange três áreas cruciais: custos, segurança e meio ambiente e poderá ser empregado em diversas situações de acordo com a necessidade de cada ferrovia. Ferrovias de transporte de carga visam minimizar o desgaste de trilhos, rodas e a superestrutura da via, ou seja, diminuir o custo operacional e em algumas situações particulares, como por exemplo, na transposição de uma cidade, o ruído é fator de preocupação. Os sistemas de transporte de passageiros visam à minimização de ruídos e a maximização do conforto dos passageiros. Em ambas as situações, seja uma ferrovia de carga ou de passageiros, o Gerenciamento de Atrito é a solução para as questões apresentadas acima.

Os conceitos básicos para o melhor entendimento da tecnologia de gerenciamento do atrito são apresentados, visando esclarecer e explicar como cada benefício é alcançado. Também são apresentados os conceitos de Tribologia, pois quanto mais ignoramos a mesma, maiores são as perdas.

O Gerenciamento do Atrito requer a utilização de dois materiais distintos em regiões diferentes do boleto do trilho, o lubrificante e o modificador de atrito. As características principais da graxa são apresentadas e o princípio de funcionamento do modificador de atrito explicado.

Os métodos de aplicação do Gerenciamento do Atrito e a metodologia de mensuração dos benefícios são abordados.

A interação entre o Gerenciamento do Atrito e o esmerilhamento de trilhos é fundamental, pois à medida que o desgaste é minimizado a fadiga torna-se a maior preocupação.

O Gerenciamento do Atrito é uma tecnologia de sinergias, além do esmerilhamento de trilhos, a metalurgia e os perfis transversais dos trilhos e rodas, e a geometria da via estão envolvidos.

O emprego da tecnologia de Gerenciamento do Atrito na interface roda-trilho já está sendo utilizado em várias ferrovias ao redor do mundo, quebrando paradigmas e tornando realidade benefícios nunca antes previstos. O presente trabalho aborda os fundamentos desta tecnologia.

Palavras-chaves: Gerenciamento do Atrito, coeficiente de atrito, lubrificadores, aplicadores TOR.

ABSTRACT

This monograph aims to present the new technology Friction Management for rail systems. Friction Management is to control the friction in the wheel-rail interface at optimal levels to optimize railway operation.

Friction management covers three critical areas for railroad operation, costs, safety and environment. The management of the friction may be employed in various situations according to the needs of each railway. Heavy Haul railroads aim to minimize wear of rails and the wheels, keeping track superstructure, minimize operating costs, and in some particular situations, such as freight trains across a city, noise is a concern. Transit systems aim to minimize noise and maximize ride quality. In both situations, is a railroad freight or transit, Friction Management is the solution to the issues presented above.

The basic concepts for a better understanding of Friction Management technology are presented in order to clarify and explain how each benefit is achieved. The concepts of tribology are presented, because the more we ignore the tribology greater the losses.

Friction Management requires the use of two different materials in different regions of the railhead, lubricant and friction modifier. The main characteristics of the grease for use in the gage face lubrication are presented. Friction modifier principle is explained.

The methods of application of Friction Management and methodology for measuring the benefits are covered.

The interaction between the friction management and grinding rails is essential because as wear is mitigated fatigue becomes a major concern.

Friction management is a technology synergies, as well as grinding rails, rail and wheel metallurgies, profiles of wheels and rails and track geometry are involved.

The use of Friction Management technology in wheel-rail interface is becoming reality in various railroads around the world, paradigms are being broken and benefits which were not expected before, are becoming reality.

Index terms: Friction Management, coefficient of friction, lubricators, TOR applicators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Retorno financeiro das recentes tecnologias em aplicação nas ferrovias norte americanas. (SAMUELS, KALAY, & ILER, 2003).....	23
Figura 2: Interface roda-trilho.....	24
Figura 3: Nomenclatura da seção transversal do boleto do trilho e da roda.	26
Figura 4: Forças no contato roda-trilho. Fonte: (MAGEL E. E., 2005)	26
Figura 5: Forças e tensões que os trilhos são submetidos. Fonte: (RailCorp, 2009).....	27
Figura 6: Formas e posições do ponto de contato. Fonte: (POLACH, 2010)	27
Figura 7: Variações da forma e posição do ponto de contato no topo do trilho.....	28
Figura 8: Inscrição de uma curva a direita do rodeiro-guia. (LEWIS & U., 2009)	28
Figura 9: Regiões possíveis do contato roda-trilho. (IHHA, 2001)	28
Figura 10: Diagrama da frequência relativa do contato (pummelling) para trilho interno e externo de uma curva de raio 218 metros. (KALOUSEK J. , 1986)	29
Figura 11: Diferenças do ponto de contato entre o rodeiro-guia e rodeiro rebocado numa curva a direita. (IHHA, 2001)	30
Figura 12: Três possíveis regiões de contato no boleto do trilho e a roda	30
Figura 13: Tensões geradas no contato roda-trilho. (IHHA, 2001)	32
Figura 14: Força de tração aplicada no ponto de contato modifica o bulbo de tensões.....	33
Figura 15: Divisão da área de contato.....	33
Figura 16: Ação das forças tangenciais no rodeiro em curva.....	33
Figura 17: Creepage longitudinal.	34
Figura 18: Relação entre tração e creepage no contato roda-trilho. (LEWIS & U., 2009)	34
Figura 19: Curva tração x creepage.....	35
Figura 20: Creepage lateral.	35
Figura 21: Creepages inerentes ao contato roda-trilho.....	36
Figura 22: Dois pontos de contato.	36
Figura 23: Um ponto de contato	37
Figura 24: Contato conformal.	37

Figura 25: Visualizações do pummelling. (MAGEL, KALOUSEK, & CALDWELL, 2004)	38
Figura 26: Desgaste concentrado na roda. (TOURNAY & MULDER, 1995)	38
Figura 27: Mecanismo do desgaste adesivo. (Society of Tribologists and Lubrication Engineers).....	40
Figura 28: Partículas de desgaste adesivo severo.....	40
Figura 29: Seção transversal da partícula de desgaste adesivo severo.	41
Figura 30: Partículas de desgaste oxidativo.	41
Figura 31: Seção transversal das partículas de delaminação geradas por desgaste de fadiga superficial.	42
Figura 32: Superfície do topo do trilho abradada por partículas de areia esmagadas.	43
Figura 33: Trincas e perda de material resultante da situação de desgaste rolamento e deslizamento.	43
Figura 34: Taxas de desgaste do material de uma roda R8T obtida através do teste <i>twin-disc</i> . (LEWIS & U., 2009).....	44
Figura 35: Defeitos de RCF.	46
Figura 36: A esquerda estágio inicial de head check e a direita estágio intermediário.....	47
Figura 37: Estágio severo de head checks.....	47
Figura 38: Aparência do defeito de shelling. (LAUFER, GHONEM, KALOUSEK, & STONE, 1982)	48
Figura 39: Exemplos de shelling.	48
Figura 40: Exemplo de flaking.	49
Figura 41: Relação de Tensão de Cisalhamento x Tração x profundidade das trincas. (RailCorp, 2009)	50
Figura 42: Influência da tração na tensão de cisalhamento. (STEELE & REIFF, 1981).....	50
Figura 43: O crescimento das trincas pode ser dividido em fases, cada uma delas caracterizada por diferente mecanismo de crescimento das trincas. (LEWIS & U., 2009)	51
Figura 44: Fases de crescimento de uma trinca na seção transversal do boleto do trilho. (SROBA P. , Rail Grinding - Presentation to VALE, 2012)	52
Figura 45: Mecanismo de crescimento das trincas assistidos por fluidos.	53
Figura 46: Distribuição interna típica de tensão residual.	54
Figura 47: Representação sistemática da flexão do trilho.....	54

Figura 48: Orientação das trincas na roda e no trilho externo. (TUNNA, SINCLAIR, & PEREZ, 2006) e (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)	55
Figura 49: Orientação das trincas na roda e no trilho interno. (TUNNA, SINCLAIR, & PEREZ, 2006) e (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)	55
Figura 50: Exemplo de Squat.....	56
Figura 51: Etapas do desenvolvimento do Squat no topo do trilho. (BOGDANSKI & LEWICKI, 2006)..	57
Figura 52: Defeito de squat na banda de rodagem do trilho.....	58
Figura 53: Squat em AMV's.....	58
Figura 54: Severo squat em linha heavy haul.	59
Figura 55: Severo squat em solda flash-butt.....	59
Figura 56: Severo squat múltiplo.	59
Figura 57: Corrugação "Short Pitch" típica em linha de trem metropolitano.	60
Figura 58: Superfície de rolamento dos dois trilhos onde apenas o trilho Interno possui corrugação.	61
Figura 59: Amplitude e comp. de onda de corrugação tipo Long Pitch.....	61
Figura 60: Fenômeno Stick-slip.	62
Figura 61: Visualização no trilho e na roda da ocorrência do stick-slip.....	62
Figura 62: Mecanismo de formação da Corrugação. (KALOUSEK & GRASSIE, 1993).....	62
Figura 63: Regimes básicos de lubrificação.....	64
Figura 64: Representação esquemática do terceiro corpo.....	66
Figura 65: Perspectiva metalográfica da seção transversal da superfície de rolamento do trilho.....	66
Figura 66: Modelo Bathtub do terceiro corpo.	67
Figura 67: Coeficientes de atritos ideais. (KALOUSEK J. , 1997).....	69
Figura 68: Benefícios do gerenciamento do atrito na face de bitola. (EADIE D. , 2010).....	70
Figura 69: Possíveis desgastes dos trilhos. (MAGEL E. , 2011).....	70
Figura 70: Asperidades do contato.	71
Figura 71: Partículas de óxido de ferro no terceiro corpo. (STOCK & OLDKNOW, 2010)	72
Figura 72: Partículas de óxido de ferro e modificador de atrito no terceiro corpo. (STOCK & OLDKNOW, 2010)	72
Figura 73: Efeito da tensão de cisalhamento = Ratcheting. (Fassarella & Rajkumar, 1999).....	73

Figura 74: Diagrama do Shakedown.	75
Figura 75: Diferentes respostas para o ciclo de carregamento. (SHEN, KAPOOR, LU, & XU, 2009)	76
Figura 76: Fatores que influenciam a teoria do Shakedown.....	77
Figura 77: Variação do COF no diagrama de Shakedown.	77
Figura 78: Relação de Nadal e COF.	79
Figura 79: L/V no trilho interno e externo.	79
Figura 80: Forças simplificadas existentes quando um rodeiro-guia inscreve uma curva.....	80
Figura 81: Forças geradas quando o truque inscreve uma curva apertada.....	80
Figura 82: Placa de apoio cortando o dormente e placas de apoio fraturadas devido à alta força lateral.....	81
Figura 83: Hunting: os rodeiros oscilam para esquerda, e logo em seguida oscilam para a direita.....	83
Figura 84: Oscilação de hunting no truque.	83
Figura 85: Hunting no rodeiro.....	83
Figura 86: Escoamento não uniforme da graxa no reservatório do lubrificante.	85
Figura 87: Separação de óleo da graxa no reservatório.....	86
Figura 88: Ensaio Four Ball.	87
Figura 89: Ensaio Timken	88
Figura 90: Modificador de atrito Keltrack.	90
Figura 91: Modificador de Atrito em bastão sólido HPF.	90
Figura 92: Situação teórica da curva tração x creepage.	91
Figura 93: Situação Prática da curva tração x creepage.....	91
Figura 94: Característica de Fricção Positiva	92
Figura 95: Aplicação de areia, enrijecedor de tração.....	92
Figura 96: Aplicação de gel Enrijecedor de tração.	93
Figura 97: Aplicação de Bastão Sólido - LCF.	94
Figura 98: Método de transferência de lubrificante a partir do LCF.....	95
Figura 99: Típica distribuição de LCF em sistemas de metrô.	96
Figura 100: Aplicação do LCF nos novos trens do MetrôRio.....	96

Figura 101: Aplicação de spray de lubrificante.	97
Figura 102: Aplicação de graxa a partir de um veículo rodoferroviário.....	97
Figura 103: Posição do filete de graxa na face de bitola do trilho.....	98
Figura 104: Verificação do filete de graxa com gabarito.	98
Figura 105: Layout de instalação de lubrificadores da face de bitola.....	99
Figura 106: Instalação típica do lubrificador ao lado da via na MRS Logística.....	99
Figura 107: Barras aplicador Portec/LBFoster MC4-XL com 16 portas e guia de graxas.	100
Figura 108: COF antes e após e Esmerilhamento de Trilhos.....	101
Figura 109: Excesso de graxa na barra distribuído gera arremessamento da graxa (fling-off).	102
Figura 110: Interface de gerenciamento remotos dos lubrificadores Portec/LBFoster Protector IV.	103
Figura 111: Defeito sub-superficial, DSS - Deep Seated Shell, com formação de fratura transversal no trilho. (SROBA, RONEY, MAGEL, & KALOUSEK, 2007)	103
Figura 112: Perfis de trilho antes e depois do esmerilhamento, em destaque nenhuma remoção de material no canto de bitola.	104
Figura 113: Novo padrão de esmerilhamento, com remoção de material no canto de bitola.	104
Figura 114: Fraturas de trilho na MRS Logística.....	105
Figura 115: Caminhão de abastecimento com sistema a granel.	106
Figura 116: Diferença Conceitual entre Lubrificantes x Modificadores de Atrito. (REIFF, Implementing Top of Rail Friction Control North America Freight Railroad Experience, 2005).....	107
Figura 117: Aplicação do HPF.....	108
Figura 118: Sistema de aplicação no topo do trilho montado em vagão.	108
Figura 119: Aplicação de modificador de atrito via veículo rodoferroviário.	109
Figura 120: Layout de instalação de aplicadores TOR.....	110
Figura 121: Barra aplicadora de modificador de atrito LBFoster TOR-ML.....	110
Figura 122: Instalação típica do aplicador TOR ao lado da via na MRS Logística.....	111
Figura 123: Tribômetro portátil à esquerda, posição onde é medido o COF à direita.	113
Figura 124: Exemplo de gráfico de medição do COF.	114
Figura 125: Tribômetro de alta velocidade.	115
Figura 126: Medição do perfil do trilho com Miniprof.	115

Figura 127: Tela do Miniprof Software.	116
Figura 128: Identificação dos desgastes do trilho no Miniprof Software.	116
Figura 129: Módulo L/V.....	117
Figura 130: Redução de forças laterais com aplicação do TOR.	118
Figura 131: Ensaio de líquido penetrante: à esquerda trilho com controle do atrito no topo, e a direita trilho sem o controle do atrito.	118
Figura 132: Distribuições de tensões no contato centralizado. (ZAREMBSKI, 2011).....	119
Figura 133: Dois pontos de contato no trilho externo. (ZAREMBSKI, 2011).....	119
Figura 134: Tensões geradas por um ponto de contato no trilho externo. (ZAREMBSKI, 2011).....	120
Figura 135: Rebolos de esmerilhamento a esquerda e aspecto do trilho esmerilhado a direita. (SROBA P. , 2012).....	122
Figura 136: Angulação do motor e rebolo de esmerilhamento. (ESVELD, 2001)	122
Figura 137: RG-10 em operação na CSX em 2001.....	123
Figura 138: Esmerilhadora RGI-48 da MRS Logística.	123
Figura 139: Comparação entre as cabines de uma máquina esmerilhadora antiga e uma nova.	124
Figura 140: Tela do controle do perfil do trilho de uma máquina esmerilhadora.....	124
Figura 141: Magic Wear Rate.	125
Figura 142: Taxa Mágica do desgaste com efetivo Gerenciamento do Atrito e Ciclo de Esmerilhamento.	127
Figura 143: Redução da força lateral na ferrovia UP. (REIFF, MAKOWSKY, & GEARHART, Implementation Demonstration of Wayside Based TOR Friction Control Union Pacific Railroad - Walong, CA, 2005)	129
Figura 144: Redução média da força lateral na CPRail.	130
Figura 145: Economia de combustível mensurada na CP Rail com emprego do Gerenciamento do Atrito.....	130
Figura 146: Redução de força lateral na CN.....	131
Figura 147: Comparação da taxa média de desgaste (mm/MGT) entre a zona controlada sem Gerenciamento do Atrito e a zona com Gerenciamento do Atrito. As porcentagens com a redução da taxa de desgaste estão listadas acima das respectivas colunas.....	132
Figura 148: Distribuição de forças laterais nos testes da MRS Logística.	133
Figura 149: Taxas de desgaste dos trilhos no zona de teste em Pinheiral.....	133

Figura 150: Média de força lateral no rodeiro guia com e sem aplicação de TOR.	134
Figura 151: Taxa de quebra de grampos (ajustada pela frequência de tráfego).	134
Figura 152: Rodeiros com aplicação de LCF.	135
Figura 153: Desgaste do flange sem e com a aplicação do LCF, trem SM-1.	136
Figura 154: Desgaste do flange sem e com a aplicação do LCF, trem SM-2.	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Regimes de desgaste. (LEWIS & U., 2009).....	44
Tabela 2: Tendência das taxas de desgaste roda-trilho. (TUNNA, SINCLAIR, & PEREZ, 2006).....	45
Tabela 3: Classificação de trilho quanto a dureza e a resistência ao cisalhamento (k). (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)	46
Tabela 4: Relação do COF e qualidade de lubrificação. (FROHLING, KOKER, & AMADE, 2007)	65
Tabela 5: Ação dos contaminantes no terceiro corpo.	66
Tabela 6: Níveis de atrito ideais no contato roda trilho.....	69
Tabela 7: Limites de plasticidade para variação da dureza do trilho. (KING & KALOUSEK, 1976).....	74
Tabela 8: Grau NLGI de graxas.	85
Tabela 9: Métodos de gestão do atrito.....	93
Tabela 10: Comparação entre redução de força lateral e relação L/V.	132

LISTA DE SIGLAS

AAR	(Association of American Railroads)
AC	(Alternating Current) – Corrente Alternada
AMV	Aparelho de Mudança de Via
AREMA	(American Railway Engineering and Maintenance)
ASTM	(American Society for Testing and Materials)
BHN	Brinell
COF	Coeficiente de Atrito
CP	Canadian Pacific
DC	(Direct Current) – Corrente contínua
DSS	Deep Seated Shell – defeito de RCF
EHD	Elastohidrodinâmica
EP	Extrema Pressão
EUA	Estados Unidos da América
FAST	Facility for Accelerated Service Testing
FRA	(Federal Railway Administration)
GF	(Gage Face) – Face de Bitola
GPS	(Global Position System)
HD	Hidrodinâmica
HE	(Hypereutectoid)
HP	(Horse Power) – Cavalo de força
HPF	(High Positive Friction) – modificador de atrito
HST	High Speed Train – Trem de alta Velocidade Inglês
IHHA	(International Heavy Haul Association) – Associação Internacional de Ferrovias de Carga
LCF	(Low Coeficient Friction) – bastão lubrificante
MGT	(Milion Gross Tone)

MTBT	Milhão de Tonelada Bruta Transportada
MWR	(Magic Wear Rate) – Taxa Mágica de Desgaste
NLGI	(National Lubricating Grease Institute)
NSC	Nippon Steel Corporation
PN	Passagem de nível
RME	(Rail Metallurgy Experience)
RPM	Rotações por minuto
RCF	(Rolling Contact System) – Fadiga de contato de rolamento
RGI	Série de Esmerilhadoras de Trilho Loram
THP	Trem Hora Parado
TOR	(Top of Rail) – Topo do Trilho
TTC	(Transportation Technology Center) – antigo nome do TTCl
VHPF	(Very High Positive Friction) – enrijecedores de tração

Sumário

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DE TABELAS.....	16
LISTA DE SIGLAS.....	17
Capítulo 1 – Introdução.....	22
1.1. Considerações iniciais	22
1.2. Objetivo do trabalho	25
1.3. Justificativa.....	25
1.4. Organização da monografia	25
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	26
2.1. Identificação da seção transversal da roda e do trilho	26
2.2. Forças e tensões na interface roda-trilho	26
2.3. A mecânica do contato.....	27
Tensões de contato Hertzianas	31
2.4. Forças tangenciais	33
Forças <i>Creep</i> e <i>Creepage</i>	34
2.5. Contato no flange da roda e face de bitola.....	36
2.5.1. Dois pontos de contato	36
2.5.2. Um ponto de contato.....	37
2.5.3. Contato Conformal.....	37
2.6. Pummelling	38
2.7. Desgaste	39
Desgaste adesivo severo:	39
Desgaste adesivo suave (oxidativo.....	41
Desgaste de fadiga superficial (delaminação).....	42
Desgaste abrasivo.....	42

Efeito da metalurgia sobre o desgaste:.....	44
2.8. Fadiga de contato por rolamento – RCF – Rolling Contact Fatigue	45
2.8.1. Head Checks	47
2.8.2. Shelling	47
2.8.3. Head Check na superfície de rolamento	48
2.8.4. Causas de formação de Head Checks e Shellings.....	49
2.8.5. Squats.....	56
2.9. Corrugações	59
Classificação da corrugação quanto ao tipo: (RailCorp, 2009)	60
Classificação da corrugação quanto à criticidade: (RailCorp, 2009).....	61
2.10. Adesão (LEWIS & U., 2009)	63
2.11. O atrito	63
2.12. O terceiro corpo	65
Capítulo 3 - Gerenciamento do Atrito.....	68
3.1. Redução do desgaste de trilho e de roda – Atrito como proteção contra o desgaste	70
Princípio de funcionamento do modificador de atrito:.....	71
3.2. Redução do desenvolvimento de RCF.....	73
3.3. Aumento da Eficiência Energética	78
3.4. Risco de descarrilhamento – Wheel Climb and Rail Rollover	78
3.5. Redução da Força Lateral.....	79
3.6. Redução do Ruído (EADIE., KALOUSEK, & CHIDDICKI, 2000)	81
3.7. Redução do aparecimento de corrugação	81
3.8. Redução de Hunting.....	82
3.9. Lubrificantes:.....	84
3.9.1. Graxa	84
3.9.1.1. Tipos de graxa:	88
3.10. Modificadores de Atrito	89

3.10.1.	Modificadores de atrito com característica de atrito positivo – HPF (High Positive Friction)	89
3.10.2.	Enrijecedores de atrito – VHPF (Very High Positive Friction)	92
3.11.	Métodos de gestão do atrito	93
3.11.1.	Métodos de aplicação da lubrificação na face de bitola do trilho/flange da roda	93
3.11.2.	Gestão do atrito no topo do trilho	106
Capítulo 4 - Metodologia de mensuração dos benefícios		113
4.1.	Medição do coeficiente de atrito	113
4.1.1.	Tribômetro Portátil	113
4.1.2.	Tribômetro de Alta Velocidade (IHHA, 2001)	114
4.2.	Acompanhamento do desgaste do trilho	115
4.3.	Medição de Forças L/V	117
4.4.	Ensaio de líquido penetrante	118
Capítulo 5 – Sinergias entre esmerilhamento de trilhos e gerenciamento do atrito		119
Lubrificação e Esmerilhamento		126
Controle do atrito no topo e Esmerilhamento		127
Capítulo 6 - Conclusão		128
6.1.	Resultados do emprego do Gerenciamento do Atrito	128
Union Pacific Railroad – Ferrovia Heavy Haul - EUA		128
Canadian Pacific Railway – Ferrovia Heavy Haul – Canadá e EUA		129
Canadian National – Ferrovia Heavy Haul – Canadá		130
Shouhaung Railway (SHR) – Ferrovia Heavy Haul – China (EADIE D. , et al., 2011)		131
MRS Logística – Ferrovia Heavy Haul – Brasil (JORGE, RODRIGUES, VIDON, VIDON, CALDWELL, & SROBA, 2009)		132
Heathrow Express (HEX) – Metrô de Londres (CHESTNEY, DADKAH, & EADIE, 2009)		133
KAMOME Express – Trem de alta velocidade - Japão (EADIE, OLDKNOW, OKA, HUI, KLAUSER, & DICK, 2010)		135
7.	Referências Bibliográficas	137

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Considerações iniciais

As ferrovias norte-americanas usaram por muitos anos lubrificadores mecânicos instalados ao lado da via para reduzir o consumo de trilhos e rodas em curvas apertadas. Devido à dificuldade de manter os lubrificadores mecânicos em bom estado de funcionamento, as ferrovias desistiram de dar importância à lubrificação após a década de 1960. Nos anos 70, as ferrovias que continuaram a acreditar na lubrificação dos trilhos obtiveram no melhor ponto de vista, um sucesso modesto. (GUDINESS, 1989)

Entretanto, o governo dos Estados Unidos decidiu, em meados de 1965, construir o *Transportation Test Center (TTC)* em Pueblo, Colorado. Em 1976, a linha de teste *FAST (Facility for Accelerated Service Testing)* estava construída. *FAST* é uma linha dedicada a testes e ensaios em forma de circuito (*loop*) em que um trem tipo de alta carga por eixo trafega em condições controladas e a via acumula tonelagem rapidamente. Em 1978, o governo federal dos EUA e a indústria ferroviária americana iniciaram uma longa série de experimentos no *FAST* que ficaram conhecidos como *RME (Rail Metallurgy Experience)*. Durante os testes, os trens trafegavam alternadamente em períodos lubrificados e sem lubrificação. Os primeiros resultados convenceram a cética indústria ferroviária a voltar às atenções para a manutenção dos lubrificadores mecânicos instalados ao lado da via, pois poderia resultar em considerável redução do desgaste de trilhos em curvas e rodas, além que as ferrovias pensavam que fosse possível. Em 1983, quando o *RME* estava sendo finalizado, o gerente do experimento fez uma descoberta acidental e surpreendente, que o trem que trafegava na via lubrificada não somente gastavam menos combustível do que o trem em via sem lubrificação, mas significativa economia de energia ocorria quando os trens trafegavam em tangentes. A partir daí membros do comitê de Energia da *AAR* iniciaram estudos em ferrovias americanas para validar a descoberta. Durante as décadas de 80/90, os benefícios da lubrificação do flange da roda e face de bitola foram confirmados e divulgados, e os investimentos em pesquisas foram direcionados para desenvolver equipamentos para lubrificação da interface roda-trilho tanto para sistemas fixos convencionais (ao lado da via), sistemas móveis e embarcado em locomotivas. (GUDINESS, 1989)

Com o avanço tecnológico das últimas três décadas, os lubrificadores fixos instalados ao lado da via foram atualizados, conseguindo mudar a imagem do passado de alta demanda de manutenção

e baixa disponibilidade. Saíram de cena os lubrificadores mecânicos para cederem lugar para os modernos lubrificadores eletrônicos.

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

No entanto, a tecnologia focada no controle do atrito está avançando rapidamente em muitas frentes. Em 2003, no congresso da IHA em Dallas/USA foi divulgado que o gerenciamento do atrito da interface roda-trilho foi considerado pelo pelas instituições de pesquisas e pelo governo americano como a tecnologia que apresentava nos próximos 15 anos a segunda mais alta taxa de retorno financeiro dentre as 12 principais tecnologias em aplicação pelas ferrovias norte americanas Figura 1. (SAMUELS, KALAY, & ILER, 2003)

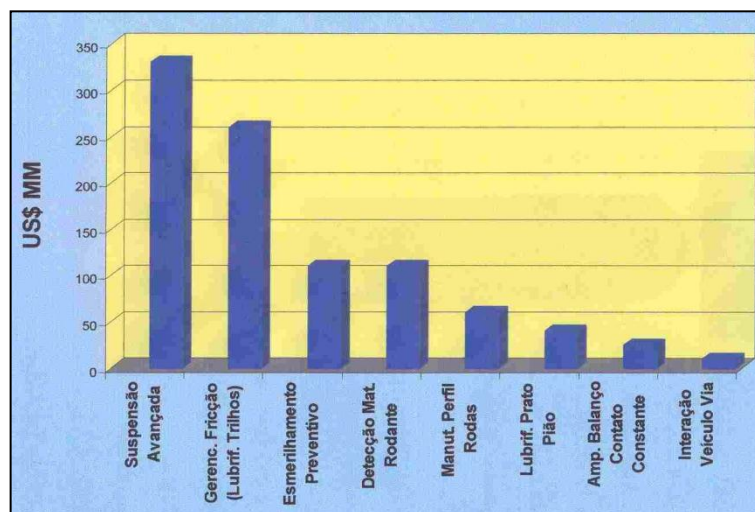


Figura 1: Retorno financeiro das recentes tecnologias em aplicação nas ferrovias norte americanas. (SAMUELS, KALAY, & ILER, 2003)

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

A ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo, assuntos e práticas relacionadas chama-se Tribologia (do grego 'tribo' significando 'esfregar, atritar, friccionar', e 'logos' significando 'estudo'). A tribologia une os campos da mecânica, física, química, materiais e os conhecimentos em lubrificação, atrito e desgaste para prever o comportamento de sistemas físicos.

O desgaste resulta em perda de material e o atrito resulta em perda de energia. Ambos os tipos de perda geram custos e quanto mais ignoramos a tribologia maiores são as perdas.

O atrito desempenha um papel importante na interface roda-trilho, particularmente na adesão, frenagem, desgaste, RCF, formação de rodas calejadas, inscrição de curvas e *hunting* de vagões e locomotivas, ruído e descarrilhamento por subida de roda.

O contato roda-trilho (Figura 2) é extremamente complexo. Um conhecimento multidisciplinar é necessário para entendê-lo, modelá-lo e otimizá-lo. O contato roda-trilho é absolutamente crítico para a segurança e eficiência operacional de uma malha ferroviária.



Figura 2: Interface roda-trilho.

Muito da complexidade do contato roda-trilho é devido ao fato de ser uma interface de natureza aberta, sendo assim sujeito a variações constantes. Ao longo de uma seção de linha, a posição, o tamanho e o esforço resultante também variam constantemente e diferentemente, não somente para cada tipo de veículo, mas também para cada roda de cada veículo, apesar de iniciar de um mesmo perfil que irá desgastar em diferentes modos.

1.2. Objetivo do trabalho

Apresentar de forma simples e objetiva quais os benefícios tangíveis com aplicação da tecnologia de Gestão do Atrito, relacionar os problemas práticos vivenciados no dia a dia da manutenção de via permanente e apresentar a influência do coeficiente do atrito.

1.3. Justificativa

Este trabalho justifica-se pela ausência de publicações nacionais sobre o assunto. Considerada uma tecnologia nova, o Gerenciamento do Atrito é uma excelente ferramenta para reduzir o custo operacional de uma ferrovia. Este trabalho pretende ser fonte de consulta para ferrovias que pretendem implantar o Gerenciamento do Atrito.

1.4. Organização da monografia

A presente monografia está estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo são apresentadas as considerações iniciais, o objetivo e a organização da monografia.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Neste capítulo são apresentados conceitos e fundamentos para o melhor entendimento do assunto abordado nesta monografia, o Gerenciamento do Atrito.

Capítulo 3 – Gerenciamento do Atrito: O tema é abordado detalhadamente. Os benefícios tangíveis com a adoção da tecnologia são comentados. Os métodos de aplicação da tecnologia são apresentados.

Capítulo 4 – Metodologia de mensuração dos benefícios: Um método de avaliar os benefícios alcançados com o emprego da tecnologia de Gerenciamento do Atrito é apresentado.

Capítulo 5 – Sinergias entre esmerilhamento e gerenciamento do atrito: A relação entre o esmerilhamento e gestão do atrito é apresentada.

Capítulo 6 – Conclusão: No último capítulo é apresentada a conclusão sobre o estudo do Gerenciamento do Atrito.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1. Identificação da seção transversal da roda e do trilho

A nomenclatura da seção transversal da roda e do bolete do trilho é apresentada na Figura 3.

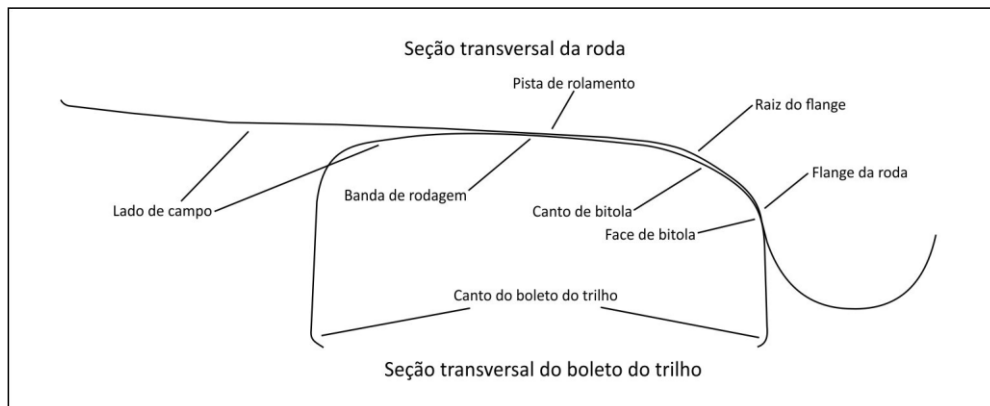


Figura 3: Nomenclatura da seção transversal do bolete do trilho e da roda.

2.2. Forças e tensões na interface roda-trilho

A interface roda-trilho sofre a ação de forças verticais, longitudinais e laterais, gerando um complexo estado de tensões: componentes de compressão, tração e cisalhamento. (IHTA, 2001)

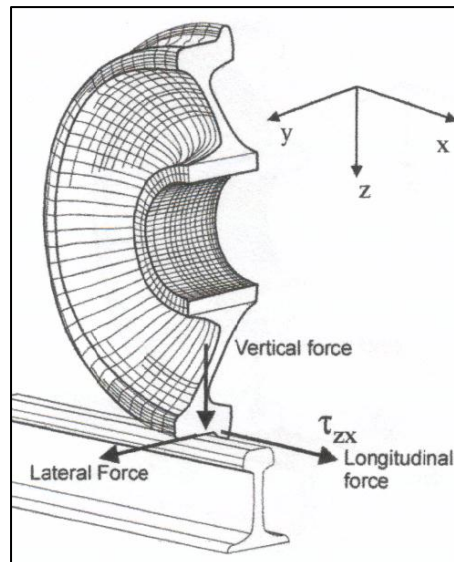


Figura 4: Forças no contato roda-trilho. Fonte: (MAGEL E. E., 2005)

As tensões mais importantes são σ_{zx} e σ_{zy} , pois causam cisalhamento na superfície do trilho (Figura 4). A Figura 5 ilustra outras tensões que os trilhos são submetidos.

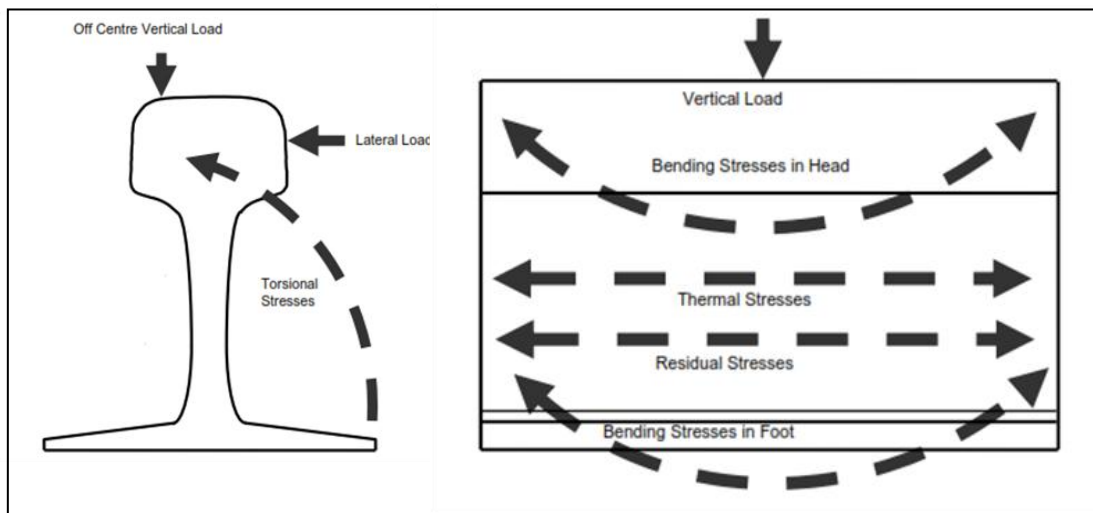


Figura 5: Forças e tensões que os trilhos são submetidos. Fonte: (RailCorp, 2009)

2.3. A mecânica do contato

O contato roda-trilho possui área de aproximadamente 1 cm^2 e sua forma e posição no trilho varia continuamente a medida que o trem trafega (Figura 6 e Figura 7). A posição exata depende dos perfis de trilhos e rodas, do raio da curva e do rodeiro guia ou rebocado bem como outros fatores de design dos truques. Em seções de via tangentes, a bandagem de rolamento das rodas e dos trilhos estará em contato enquanto que em seções de vias curvas a flange da roda e a face de bitola dos trilhos estarão em contato. (LEWIS & U., 2009)

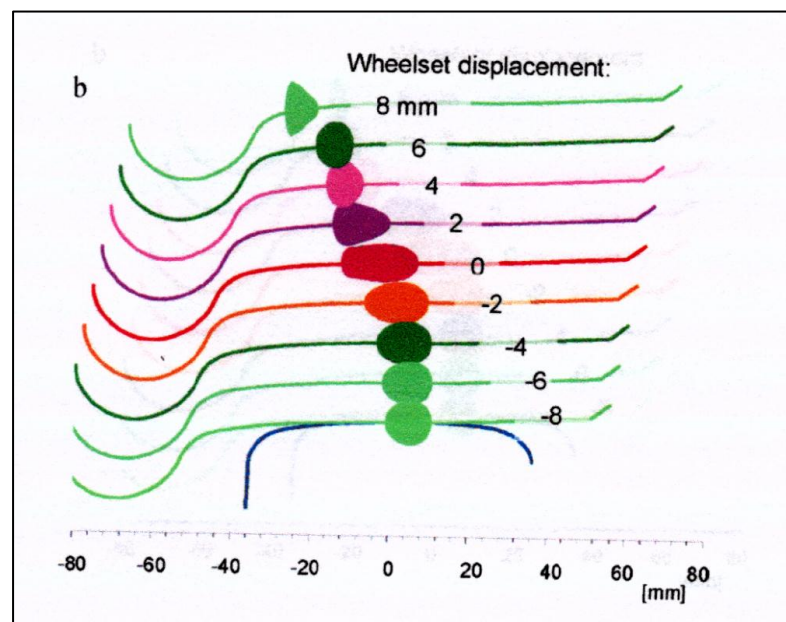


Figura 6: Formas e posições do ponto de contato. Fonte: (POLACH, 2010)

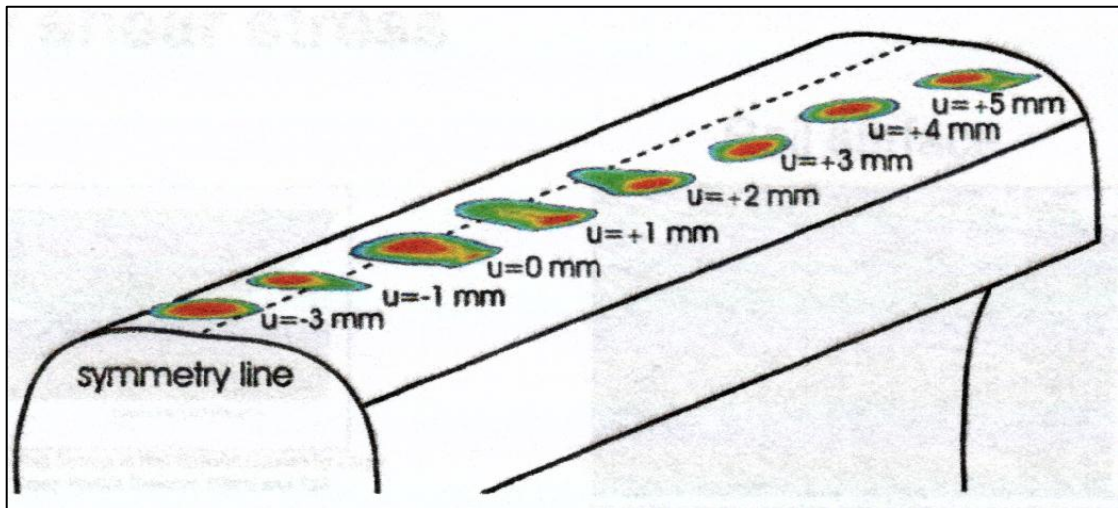


Figura 7: Variações da forma e posição do ponto de contato no topo do trilho.

A Figura 8 mostra como o ponto de contato e as tensões variam entre as duas rodas do rodeiro guia quando inscrevendo uma curva à direita.

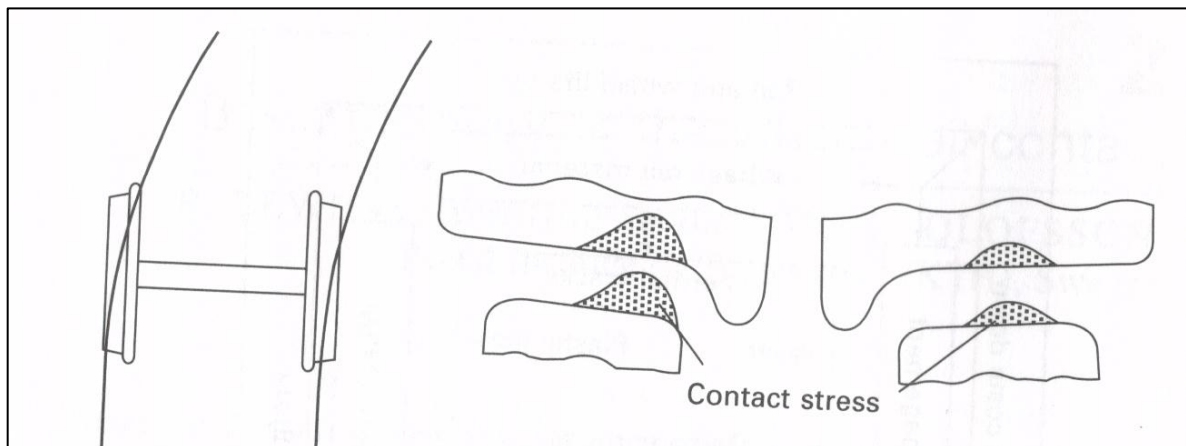


Figura 8: Inscrição de uma curva a direita do rodeiro-guia. (LEWIS & U., 2009)

O contato não é distribuído em toda a superfície do trilho e da roda; ele é limitado nas regiões mostradas na Figura 9. Isso significa que tanto as formas do perfil do trilho e da roda irão mudar, a questão é quanto, de qual forma, quais os limites e qual taxa de mudança. (IHHA, 2001)

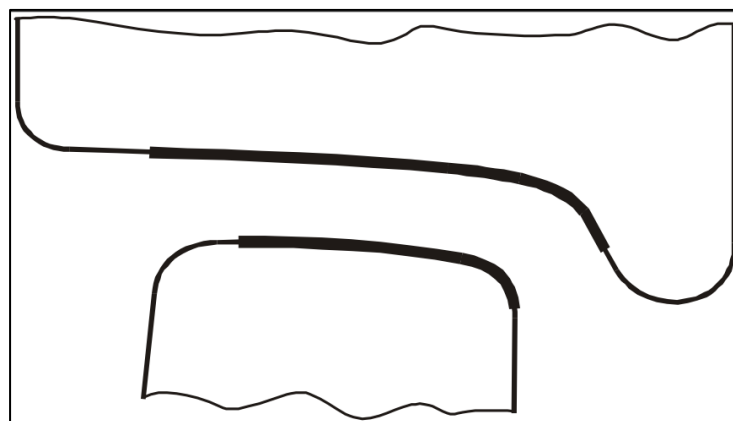


Figura 9: Regiões possíveis do contato roda-trilho. (IHHA, 2001)

O contato não é distribuído uniformemente sobre as regiões mostradas na Figura 9. Ele varia de acordo com a geometria da via e os perfis de trilhos e rodas. Quando em seções tangentes da via, o contato é maior na superfície de rolamento. Esta situação é bem definida se rodas com perfis cônicos são usadas juntamente com trilhos com curvatura na superfície de rolamento (crown). A banda de rodagem é mais bem definida quando a bitola da via é consistente. Dois pontos de contato na interface roda-trilho em tangentes precisam ser evitados, pois produzem um contato de alta conicidade e causa instabilidade nos veículos ferroviários. (IHHA, 2001)

A quantidade de desgaste e danos de fadiga de contato não é distribuída uniformemente na banda de rodagem dos trilhos. Embora a banda de rodagem no topo do trilho seja tipicamente 63,5 mm larga, a dimensão típica do círculo ou elipse de contato entre o trilho e a roda não excede 16 mm, caso seja um círculo. Para melhor entendimento da distribuição não uniforme na banda de rodagem, vamos assumir um modelo simples em que a banda de rodagem é dividida em quatro segmentos igualmente espaçados, A, B, C e D, enquanto a face de bitola seja o segmento E (Figura 10). Assumindo um cubo de unidade de volume do material é posicionado abaixo do centro de cada segmento e sujeito a um carregamento igual à média dos carregamentos atuantes no correspondente segmento. (KALOUSEK J. , 1986)

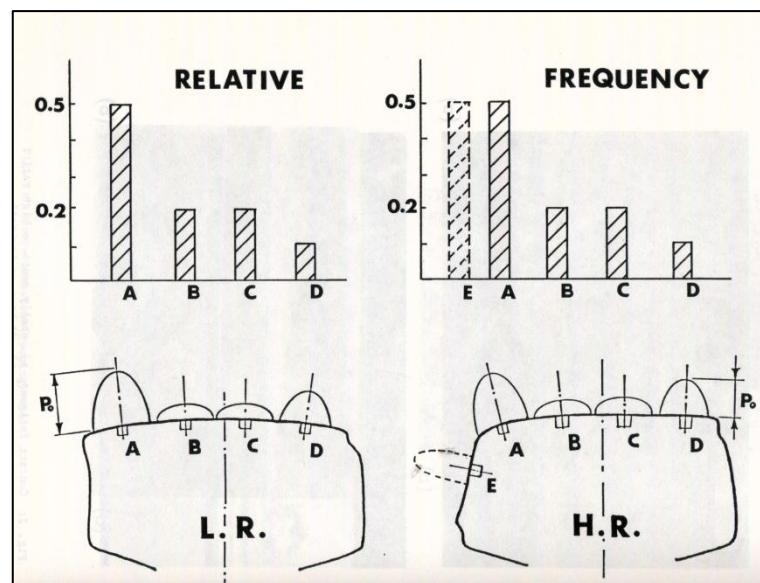


Figura 10: Diagrama da frequência relativa do contato (pummeling) para trilho interno e externo de uma curva de raio 218 metros. (KALOUSEK J. , 1986)

O desgaste e o dano por fadiga de cada segmento do material (A a E) é significativamente afetado por: (KALOUSEK J. , 1986)

- Número total de ciclos de carregamento, o qual depende da frequência do contato
- Tensão de contato
- Quantidade de micro deslizamentos (creepages) e forças de atrito (tração)
- Taxa de escoamento plástico

A distribuição do ponto de contato no perfil da roda em curvas é invariavelmente simétrico, se existe um equilíbrio entre curvas esquerdas e direitas. O ponto de contato nos trilhos é

assimétrico e depende do sentido da curva. Em caso de uma roda do rodeiro guia sobre o trilho externo de uma curva, o contato será próximo do canto de bitola e o flange tocará a face de bitola diferentemente do que ocorre no rodeiro rebocado. Diferenças similares ocorrerão no trilho interno da curva. Essas diferenças (Figura 11) do ponto de contato são fundamentais, pois elas reduzem o número de ciclos de fadiga tanto nas rodas quanto nos trilhos.

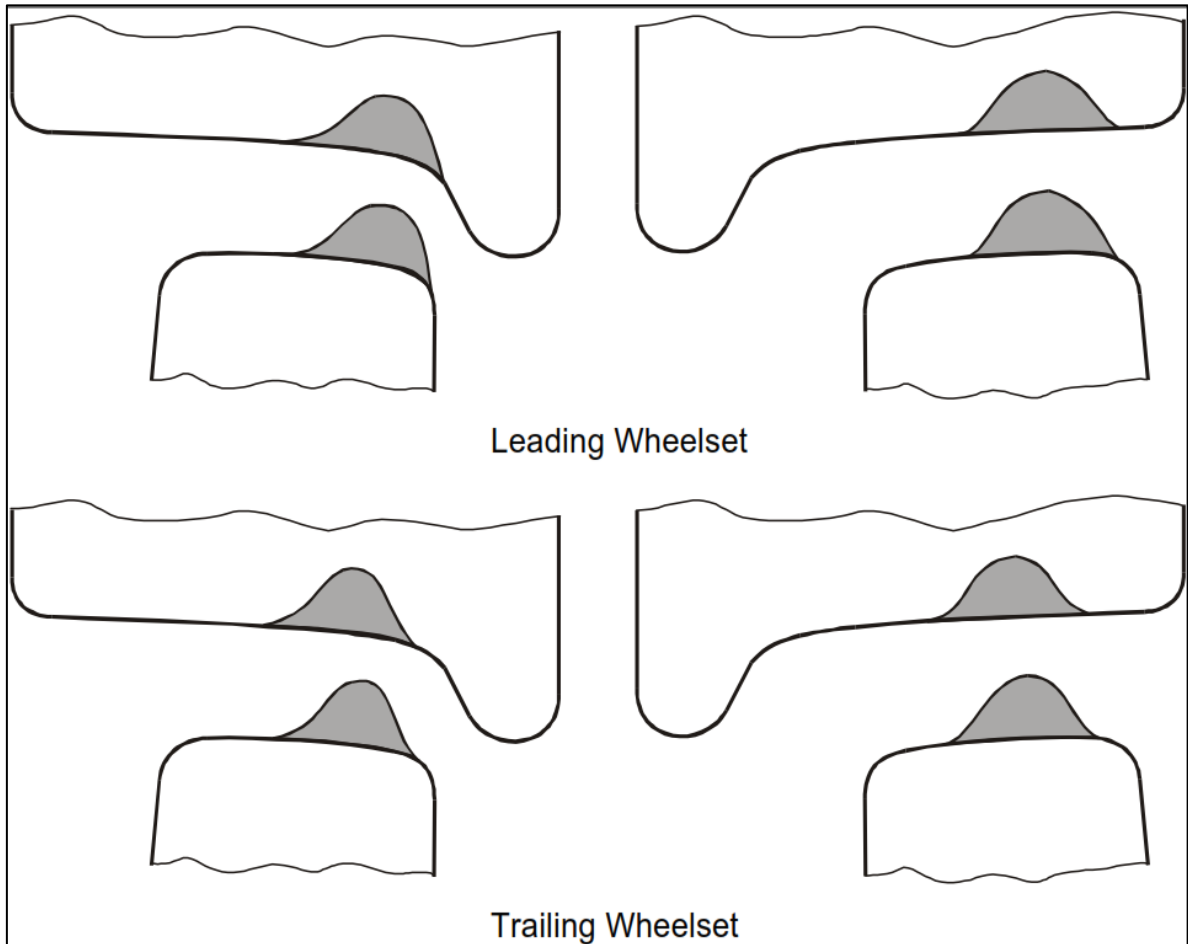


Figura 11: Diferenças do ponto de contato entre o rodeiro-guia e rodeiro rebocado numa curva a direita. (IHHA, 2001)

Três possíveis regiões do contato roda-trilho foram definidas de acordo com a Figura 12 (IHHA, 2001)

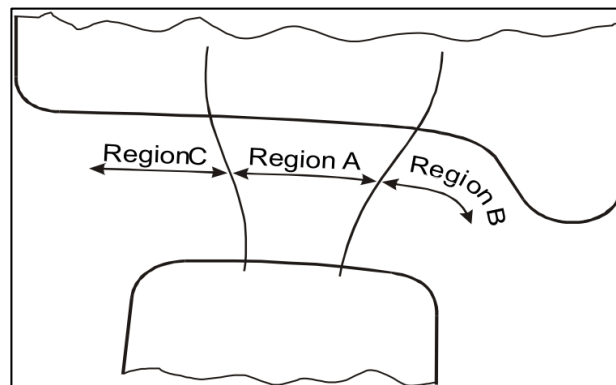


Figura 12: Três possíveis regiões de contato no boleto do trilho e a roda.

Região A – superfície de rolamento e topo do trilho: o contato roda-trilho é frequente nesta região e usualmente ocorre quando o veículo está em seções tangentes da via ou curvas com raios grandes ($R > 1000\text{m}$). Esta região fornece a menor pressão de contato e as menores forças laterais.

Região B – flange da roda e canto de bitola: o contato nesta região é muito menor que na região A e muito mais severo. Tipicamente as tensões de contato e as taxas de desgaste são altas. Se alto desgaste e escoamento plástico ocorrem, dois pontos de contato se desenvolvem gerando aparentemente contato no topo do trilho e no canto de bitola.

Região C – regiões de campo do trilho e da roda: é menos provável que o contato ocorra nesta região. Se ocorrer, altas tensões de contato são formadas e causam indesejados desgastes e atrapalham a inscrição dos truques nas curvas.

O resultado do fato da posição do contato não ser distribuída sobre todo o perfil da roda e do trilho é a mudança da forma dos perfis conforme o uso devido ao desgaste e o escoamento plástico do material.

Tensões de contato Hertzianas

As tensões de contato são causadas pela pressão de um sólido elástico sobre outro sólido em uma área limitada do contato. Muitos materiais que resistem a carregamentos, como por exemplo: vigas, trilhos, etc., são projetados primeiramente para suportar as tensões em toda a sua extensão, essa tensão é diferente da tensão de contato, pois atua nas vizinhanças do ponto de aplicação do carregamento. (KALOUSEK J. , 1975)

As tensões de contato são repetidas por uma grande quantidade de vezes, resultando em uma falha de fadiga do material, que inicia com uma fratura localizada (trinca) que é associada a uma tensão localizada. (KALOUSEK J. , 1975)

No caso específico dos trilhos, a trinca por fadiga pode subsequentemente resultar ou contribuir para ocorrência de vários tipos de danos, comumente conhecidos como *shelling*, *head checking*, *spalling* e *corrugações long pitch*. Situações de extremo desgaste nos trilhos externos das curvas são associadas a elevadas tensões de contato localizadas. (KALOUSEK J. , 1975)

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

A solução mais simples para determinar a geometria e a tensão do contato roda-trilho é a análise de Hertz (Johnson, 1985), onde a roda e o trilho podem ser equacionados como dois cilindros em contato perpendicularmente entre si. A pressão máxima de contato, p , é dada por: (LEWIS & U., 2009)

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

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

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

Onde R_1 e R_2 são os raios de contato da roda e do trilho.

Devido às considerações assumidas, como por exemplo, planicidade das superfícies de contato, resposta linear elástica do material, o atrito zero no contato, a precisão da fórmula é limitada. Particularmente no contato no flange da roda, o raio de contato pode ser menor que 10 mm, o que invalida a equação. Para um sistema de trem metropolitano, a pressão hertziana máxima de contato varia de 600 MPa na banda de rodagem e topo do trilho até 2700 MPa no flange da roda/canto de bitola (Telliskivi e Olofsson, 2001).

De acordo com a Teoria de Hertz, a tensão de compressão estática máxima é na superfície e a tensão máxima de cisalhamento é também sobre a superfície, porém numa profundidade de $0,78a$, onde a é a metade do diâmetro do ponto de contato. A modelagem de um meio espaço semi-infinito chamada Tensões Hertzianas de Contato mostra que imediatamente abaixo do ponto de contato o material é submetido a estado de tensões triaxial (Figura 13). As três componentes de tensão (longitudinal, vertical e de cisalhamento) são aproximadamente iguais a resultante da tensão de cisalhamento e a capacidade de carregamento. Logo abaixo do ponto de contato, as tensões tornam-se diferentes e a máxima tensão de cisalhamento aumenta para o valor máximo. (IHHA, 2001)

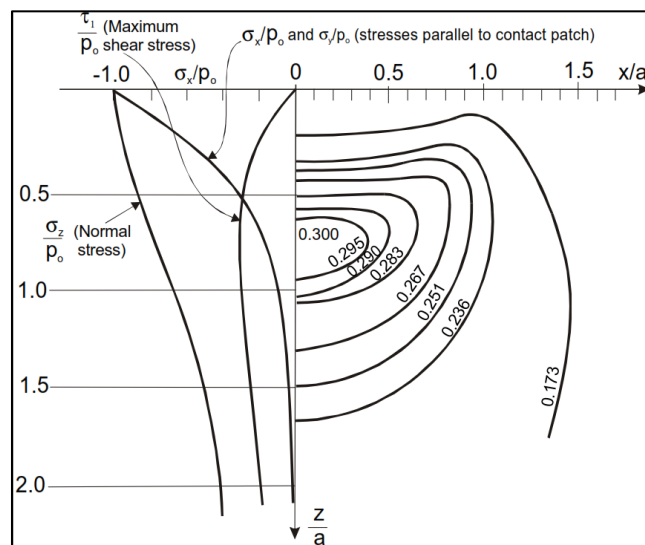


Figura 13: Tensões geradas no contato roda-trilho. (IHHA, 2001)

Quando a força de tração é aplicada a posição de máximo valor da tensão de cisalhamento move-se para perto da superfície (Figura 14). Mesmo se a deformação normal na superfície é elástica, poderá causar deformação plástica de cisalhamento sobre a superfície. Em razão do movimento de rolamento da roda, existe um ciclo de tensão de compressão e cisalhamento nas camadas abaixo da superfície, resultando num acúmulo de deformação plástica sobre a superfície e gerando tensão residual no material.

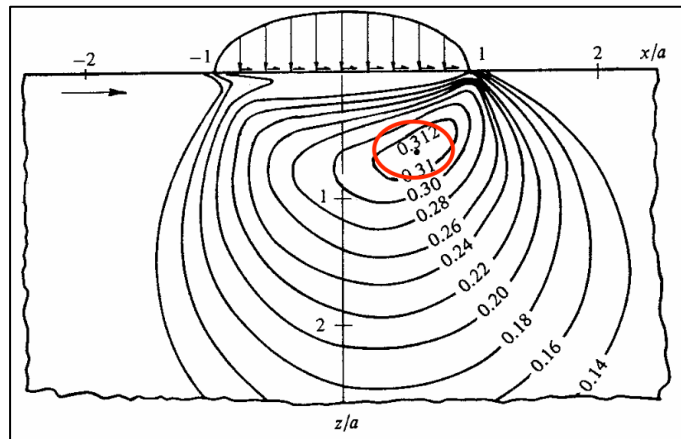


Figura 14: Força de tração aplicada no ponto de contato modifica o bulbo de tensões.

2.4. Forças tangenciais

A existência do atrito na interface de contato resulta em uma divisão da área de contato em duas regiões (Figura 15), a região de adesão a qual as superfícies rolam sem movimento relativo e a região de micro deslizamentos (micro-slip). Isto resulta em uma diferença relativa nas velocidades de rolamento das duas superfícies que é conhecido como *creep* e resultam forças conhecidas como forças *creep* (*creep forces*). (KALOUSEK J. , 1975)

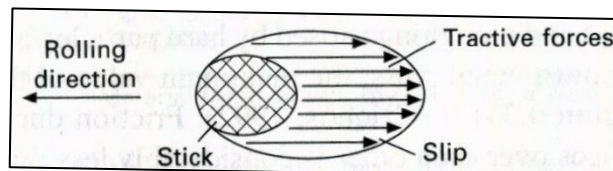


Figura 15: Divisão da área de contato.

As forças de *creep* juntamente com forças tangenciais (Figura 16) adicionais devido à aceleração, frenagem e inscrição de curvas mudam a distribuição das tensões de Hertziana na zona de contato. A máxima tensão de cisalhamento aumenta e move-se para próximo à superfície na presença de forças tangenciais. (KALOUSEK J. , Track/Train Dynamics Report #4 Rail Corrugations, 1975)

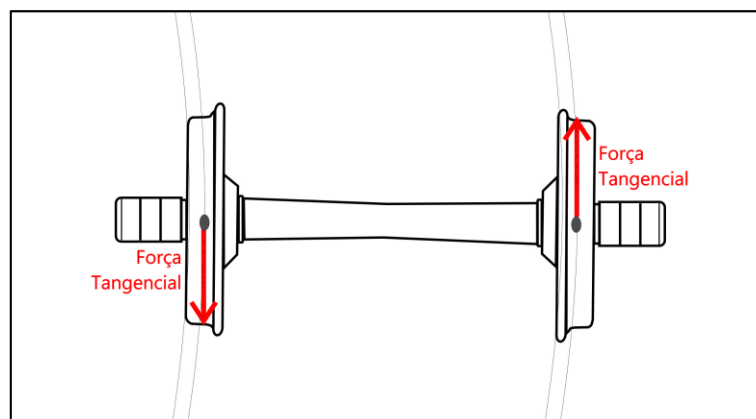


Figura 16: Ação das forças tangenciais no rodeiro em curva.

Forças Creep e Creepage

As forças *creep* (deslizamento) são originadas pelo rolamento do rodeiro cônico na via. As forças de *creep* são geradas quando o rodeiro desvia da posição de rolamento puro. *Creepage* é um fenômeno que ocorre no contato roda-trilho. Como o rolamento puro é teórico, sempre haverá um micro deslizamento no sentido contrário, perpendicular ou torsional a força de tração. Esse micro deslizamento é chamado de *creepage*. De acordo com análises cinemáticas, existem três componentes do *creepage*: longitudinal, lateral e torsional. (LEWIS & U., 2009)

O *creepage* longitudinal (Figura 17) ocorre quando a roda não percorre todo o seu perímetro sobre o trilho. O comprimento total que a roda deslizou dividido pelo o perímetro da roda é chamado de *creepage* longitudinal.

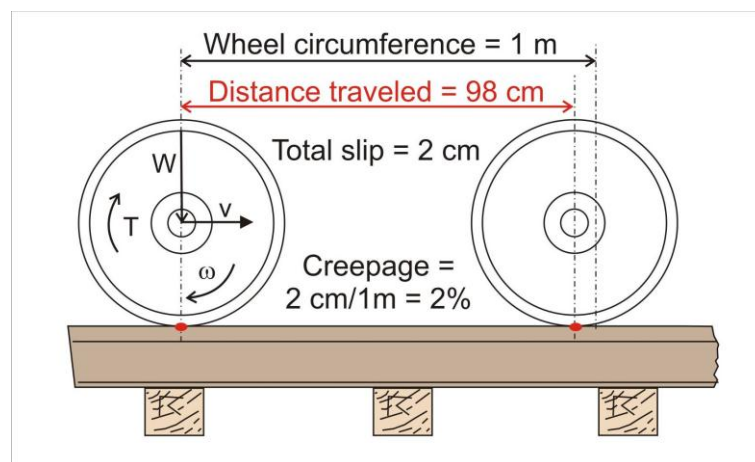


Figura 17: Creepage longitudinal.

Creep longitudinal e forças resultantes surgem porque durante a tração na direção do rolamento, deslizamento ocorre na região posterior do ponto de contato (Figura 18). (IHHA, 2001)

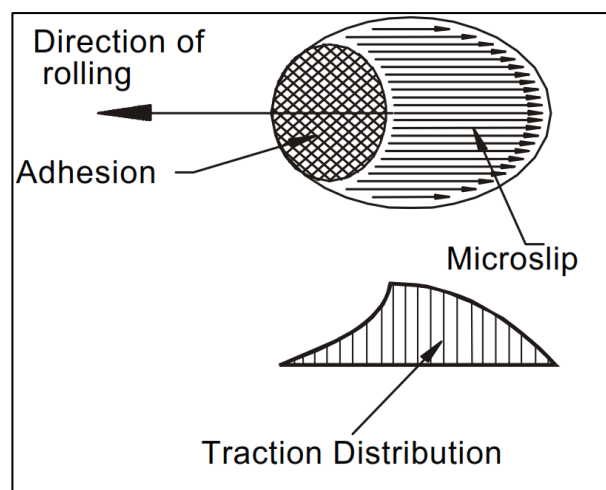


Figura 18: Relação entre tração e creepage no contato roda-trilho. (LEWIS & U., 2009)

Quanto maior o valor da força de tração, maior é a proporção da área de escorregamento no ponto de contato. Quando a força de tração alcançar o nível máximo, o ponto de contato não é capaz de absorver nenhum esforço trativo adicional, a partir deste ponto somente o deslizamento irá ocorrer. (IHHA, 2001)

O ponto de saturação da força de tração é o joelho da curva tração x creepage (Figura 19), a partir daí só ocorrerá o deslizamento (*slip*).

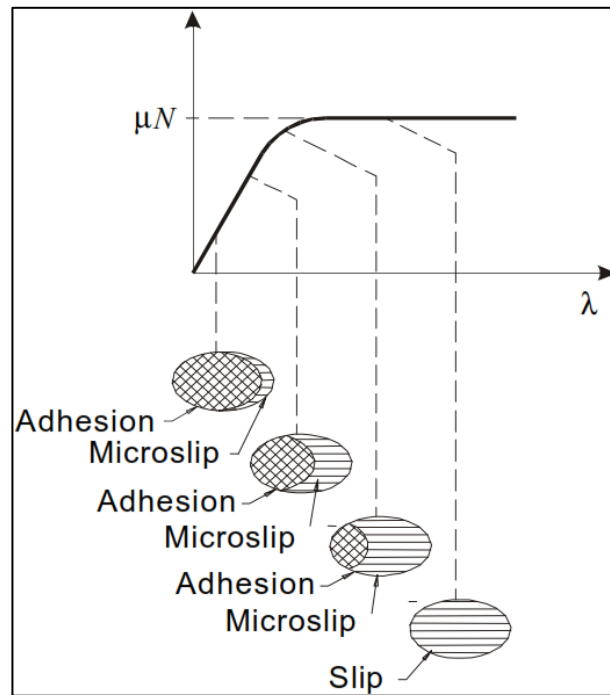


Figura 19: Curva tração x creepage.

O *creepage* lateral (Figura 20) depende o ângulo de ataque da roda no trilho.

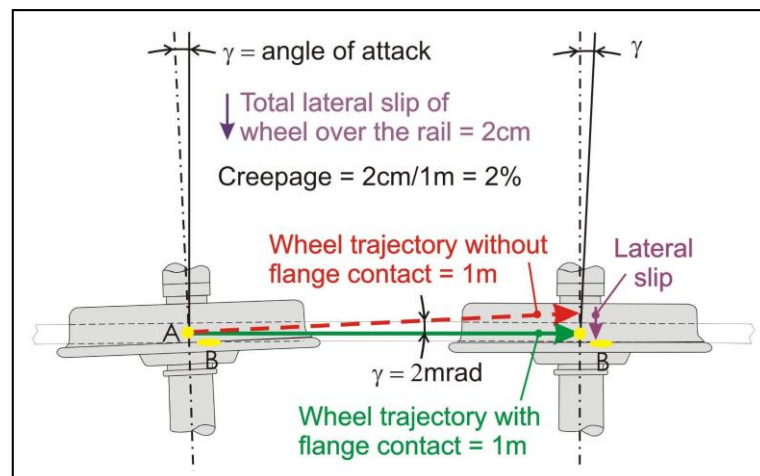


Figura 20: Creepage lateral.

O *creepage* torcional é determinado pelo ângulo da conicidade do perfil da roda. A Figura 21 ilustra todos os *creepages*.

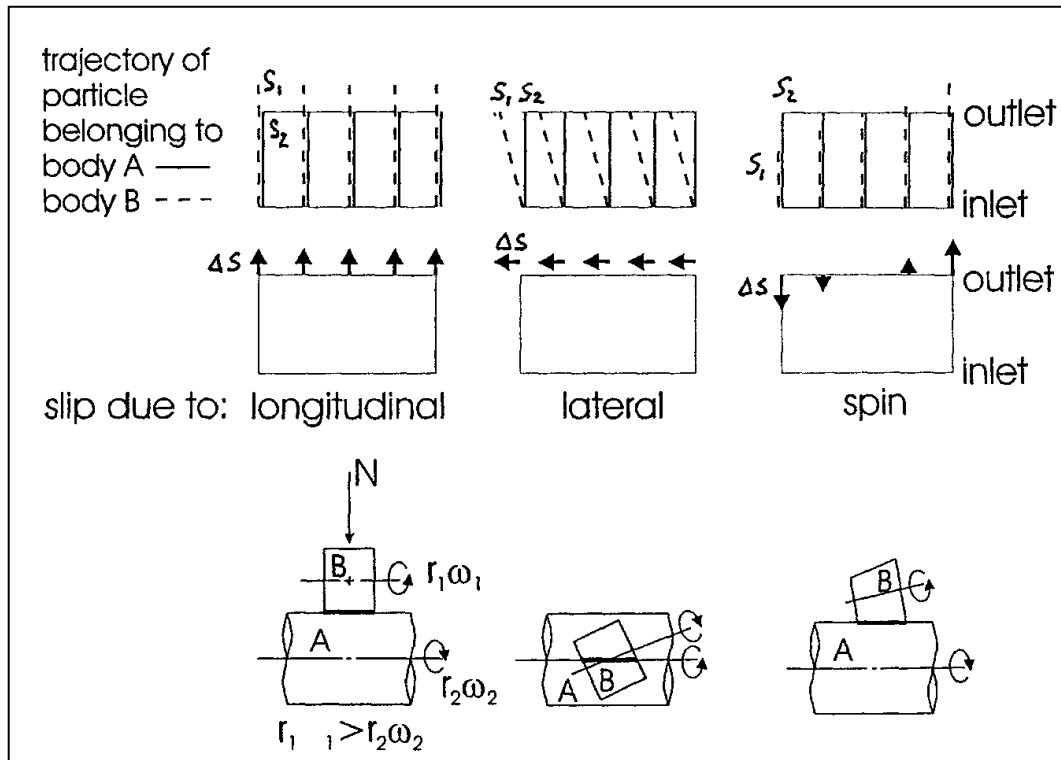


Figura 21: Creepages inerentes ao contato roda-trilho.

2.5. Contato no flange da roda e face de bitola

Existem três opções genericamente falando para considerar quando for examinar o contato no flange da roda e face de bitola. (IHHA, 2001)

2.5.1. Dois pontos de contato

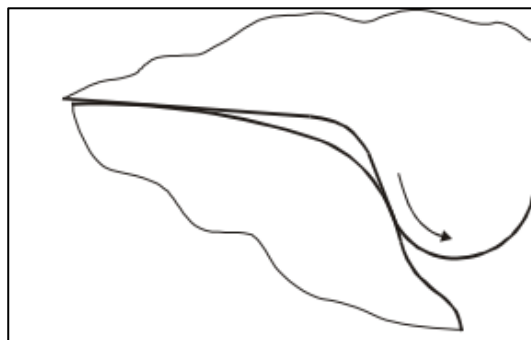


Figura 22: Dois pontos de contato.

A existência de dois pontos de contato (Figura 22) está associada a um grande deslizamento e desgaste se a força do flange e o *creepage* lateral estão presentes, no caso de curvas. Sob essas condições o flange se desgasta aceleradamente até a forma do flange conformar com a forma do trilho. O contato é tão severo que o escoamento de material ocorre no flange da roda. Sob essas

condições o flange da roda frequentemente elimina qualquer filme de lubrificante aplicado na zona de contato.

É relatado que a ocorrência de dois pontos de contato é menos prejudicial para o trilho pois o carregamento vertical é levado para longe do canto de bitola. Está prática é muito usada em trilhos com defeitos de RCF no canto de bitola devido a práticas de manutenção deficiente. Essa prática é limitada, de acordo com a diferença de raio entre os rodeiros e o momento de inscrição de curva disponível.

2.5.2. Um ponto de contato

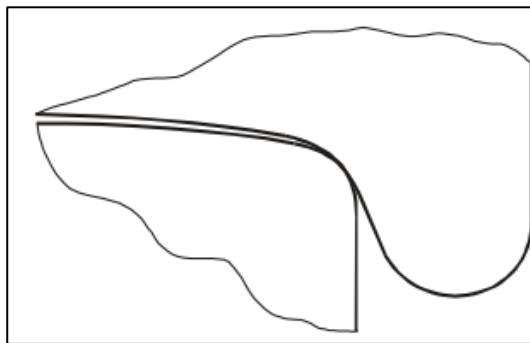


Figura 23: Um ponto de contato

Um ponto de contato (Figura 23) talvez seja a mais prejudicial para os veículos e via. Altas tensões ocorrem sob extremos deslizamentos resultando na fadiga do canto de bitola. O ponto de contato único em sua forma mais amena produz *head checks* e na pior situação provoca *spalling*.

O ponto único de contato ocorre quando o perfil da roda e do trilho for projetado incorretamente, quando o topo do trilho apresenta excessivo amassamento e quando a roda apresenta excessivo desgaste na banda de rodagem.

2.5.3. Contato Conformal

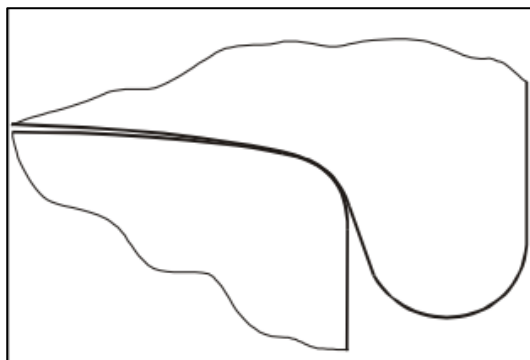


Figura 24: Contato conformal.

O contato conformal é observado quando o desgaste do canto de bitola e do flange da roda leva a formação de um perfil comum sobre extremo contato do flange no canto de bitola em curvas.

Pouco se conhece sobre as complexas condições de contato que mantêm as formas do contato da roda e do trilho similares. A forma similar do perfil da roda e do trilho adquirida é mantida e a vida útil em termos de fadiga é aumentada.

2.6. Pummelling

A área de contato nos trilhos após a passagem de uma sequência de rodeiros guias e rodeiros rebocados move-se intermitentemente do canto de bitola para o centro do trilho, do canto de bitola para o lado de campo em trilhos externos, do lado de campo para o centro do trilho ou do lado de campo para o canto de bitola em trilhos interno, esse fenômeno é conhecido como *pummelling*. (KALOUSEK J. , 1986)

Pummelling (Figura 25) é a distribuição dos pontos de contato sobre a seção transversal da roda e do trilho (*Contact Distribution* - Figura 26). Esta distribuição afeta a forma, o formato da superfície do trilho e também a velocidade de como esta superfície desgasta.

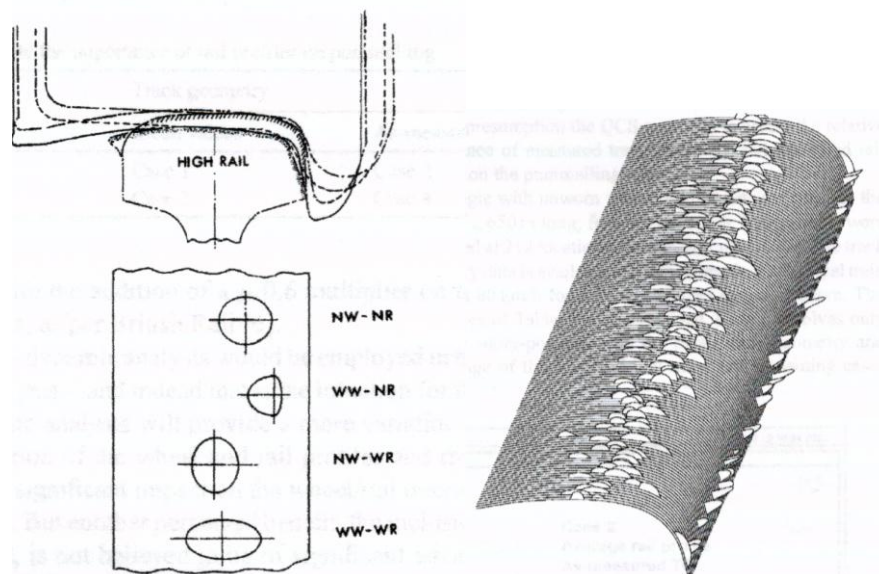


Figura 25: Visualizações do pummelling. (MAGEL, KALOUSEK, & CALDWELL, 2004)

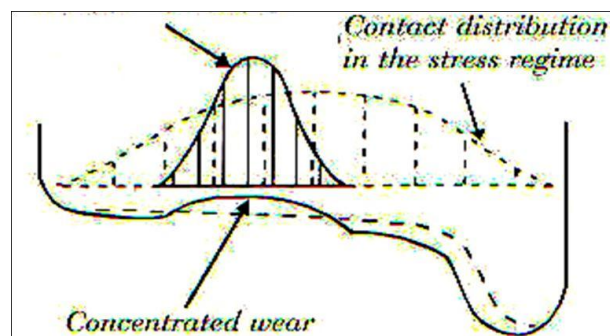


Figura 26: Desgaste concentrado na roda. (TOURNAY & MULDER, 1995)

Uma distribuição concentrada do contato resulta em um maior desgaste concentrado. A região da roda próxima do desgaste concentrado contata o trilho externo gerando tensão de contato extremamente elevada. Tensão de Contato também elevada ocorre no trilho interno quando o outro extremo do desgaste concentrado da roda estabelece contato.

2.7. Desgaste

A interação entre duas superfícies resulta em perda material de um sólido. Desgaste é a perda ou deslocamento do material na superfície de contato. O material pode desgastar-se de diferentes modos e mecanismos. A forma como um material desgasta depende da natureza do material e outros elementos tais como: condições ambientais e contaminantes presentes. (LEWIS & U., 2009)

No contato roda-trilho as principais situações de desgaste são: deslizamento e rolamento. O rolamento no contato roda-trilho é dividido em duas regiões: o rolamento e o micro deslizamento (*creepage*).

Em termos de potencial de causar desgaste, o movimento de deslizamento (movimento tangencial a superfície) é mais severo do que o movimento perpendicular à superfície, tal como ocorre com o impacto e rolamento. O número de mecanismos de desgaste que ocorre em razão do deslizamento inclui desgaste por oxidação, presente na condição de contato suave (baixo carregamento e deslizamento veloz – típico no topo do trilho-banda de rodagem). Em condições severas, desgaste adesivo (em curvas, no contato do canto de bitola com o flange das rodas). Se partículas estão presentes no contato o desgaste abrasivo também ocorre (poderá ocorrer no uso de enrijecedores de tração como a areia). Condição de severo deslizamento poderá ocasionar severo desgaste e alto aquecimento no contato, o qual causa fraturas térmicas na superfície de material (observado em curvas muito apertadas).

Nenhum outro ramo da engenharia ferroviária utiliza uma terminologia tão confusa para lidar com o desgaste. Desgaste adesivo, por delaminação, abrasivo, tribo-oxidativo, tipo I, II e III, fadiga de escoamento, corrosivo, fadiga superficial, flaking, adesivo severo, adesivo suave, e talvez muitos de outros adjetivos são usados para descrever o fenômeno de desgaste roda-trilho. Embora alguns destes adjetivos sejam sinônimos, vários tipos diferentes de mecanismos de desgaste podem ocorrer. Esses mecanismos são resultado das condições mecânicas e de lubrificação. Quatro generalizados tipos de desgaste ocorrem nos trilhos de ferrovias *heavy haul* e serão descritos nesta monografia: desgaste adesivo suave, adesivo severo, fadiga de superfície e desgaste abrasivo. Os primeiros dois tipos ocorrem em ambientes não lubrificados (secos) e os outros dois em ambientes lubrificados. (KALOUSEK & KLEIN, 1976)

Desgaste adesivo severo:

Este desgaste ocorre na interface sem lubrificação do flange da roda e face de bitola do trilho. Geralmente produz uma grande quantidade de partículas que são facilmente visíveis nas linhas ferroviárias (Figura 28). O mecanismo de desgaste é devido a uma localizada “solda” entre as asperezas do trilho da roda que forma uma junção (Figura 27). A subsequente separação destas

superfícies quebra a junção formando grandes partículas de desgaste de até 0,5 mm de espessura e 3 mm de comprimento. Este mecanismo produz altas taxas de desgaste e resulta em ásperas superfícies no flange e na face de bitola.

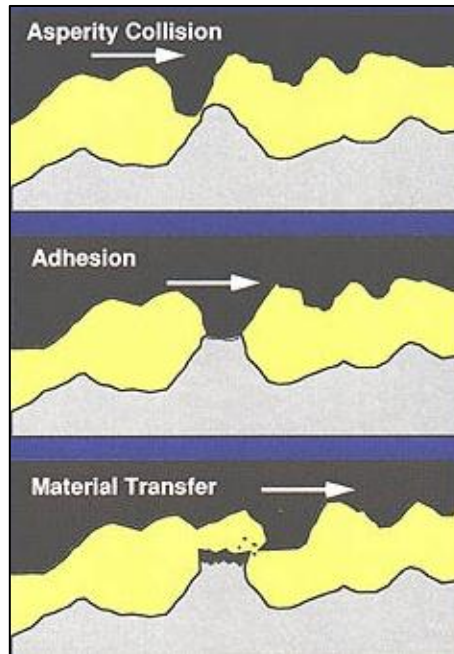


Figura 27: Mecanismo do desgaste adesivo. (Society of Tribologists and Lubrication Engineers)



Figura 28: Partículas de desgaste adesivo severo.

As partículas geradas pelo desgaste adesivo severo são mostradas na Figura 29.

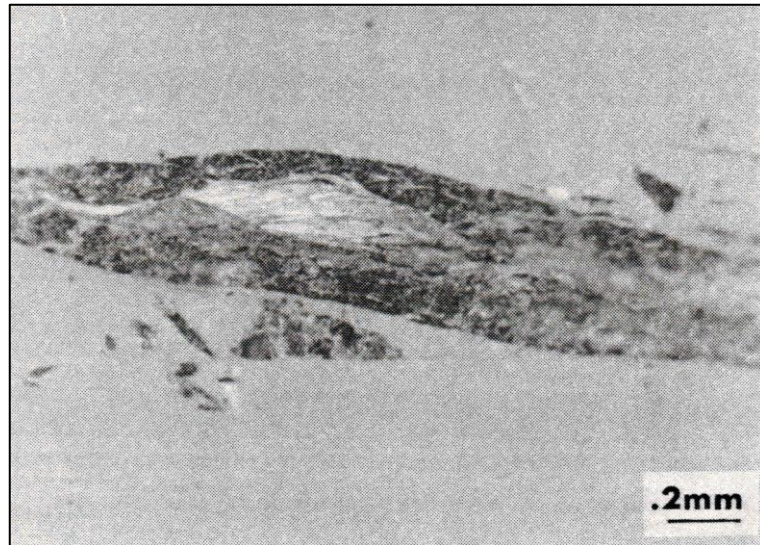


Figura 29: Seção transversal da partícula de desgaste adesivo severo.

Desgaste adesivo suave (oxidativo)

Este desgaste ocorre inicialmente no topo do trilho seco. A taxa de desgaste pode variar amplamente, dependendo da pressão do contato *Hertz* e a quantidade de deslizamento. As partículas associadas a este desgaste podem variar de tamanho, de 3 a 50 μm em espessura e de 10 a 500 μm em comprimento. As partículas de desgaste (Figura 30) contêm uma mistura deformada e oxidada de material do trilho e da roda com numerosas trincas. Trincas similares, porém menos numerosas podem ser observadas na camada superficial dos materiais da roda e do trilho, indicando que o mecanismo de geração das partículas possui um ciclo natural. Além disso, essas partículas podem aderir na superfície do trilho e da roda muitas vezes antes de serem liberadas do sistema.

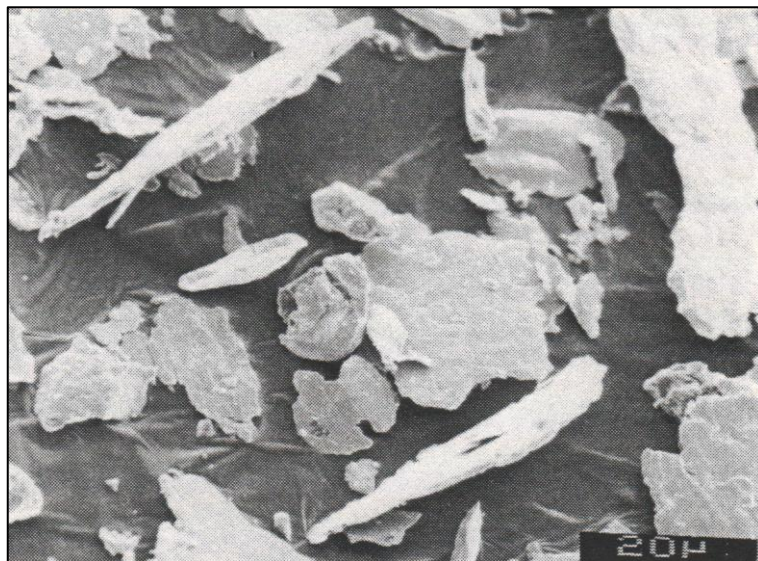


Figura 30: Partículas de desgaste oxidativo.

Desgaste de fadiga superficial (delaminação)

Esta forma de desgaste ocorre em contatos lubrificadas ou contaminadas por lubrificantes. Fadigas de superfície não devem ser confundidas com fadigas de contato. Embora o processo implica algum tipo do mecanismo de fadiga, o desgaste de fadiga superficial ocorre em pouca profundidade, não excedendo 0,05 mm. Trincas de fadiga de contato, por outro lado, podem alcançar a profundidade de 5 mm. No desgaste de fadiga superficial contato asperidade-asperidade é sempre separado por um filme de lubrificante. Como consequência nenhum material é removido das extremidades das asperidades não profundas.

Com o aumento do número de eventos de contato, micro trincas formam paralela a superfície devido à presença de inclusões de sulfeto de manganês ou instabilidade plástica do material. Milhares de contatos asperidade-asperidade ocorrem que podem resultam em trincas, e a partícula (Figura 31) formada não delamina imediatamente. As trincas são removidas após um apreciável, porém indeterminado número de ciclos de carregamento. Por esta razão, o desgaste por delaminação apresenta baixas taxas de desgaste.

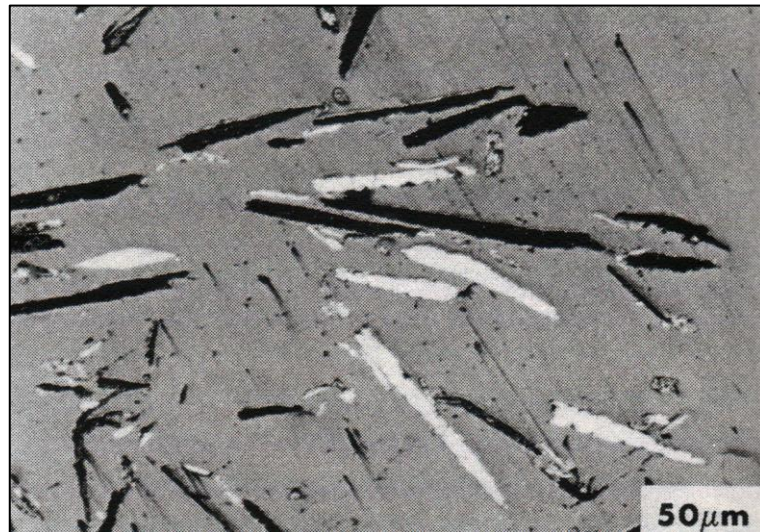


Figura 31: Seção transversal das partículas de delaminação geradas por desgaste de fadiga superficial.

Desgaste abrasivo

Esta forma de desgaste ocorre em linhas lubrificadas quando a areia é dispensada pelas locomotivas para melhorar a tração. Duas variações deste mecanismo ocorrem. Os grãos de quartzo da areia são esmagados pelas rodas em partículas microscópicas as quais são incorporados no trilho e/ou na roda causando abrasão em outra superfície (Figura 32). As partículas de areia quando misturadas com lubrificantes e seus resíduos formam uma pasta que causa abrasão tanto no trilho quanto na roda num processo idêntico ao polimento quando é usado uma pasta de polir.

Na maioria das situações, ambos os mecanismo de abrasão estão presente. As taxas de desgaste são extremamente baixas em razão da pequena distância de deslizamento gerado pelo *creepage* de grãos de pequenos tamanhos (<2 μm) das partículas de areia. Devido à baixa taxa de desgaste, essa forma de desgaste abrasivo é conducente ao desenvolvimento de desgaste de fadiga

superficial. Em ambientes lubrificados e com presença de areia os mecanismos de desgaste abrasivo e desgaste de fadiga superficial ocorrem simultaneamente e qualquer taxa de desgaste mensurada representa a soma das taxas de desgaste abrasivo e de fadiga superficial.

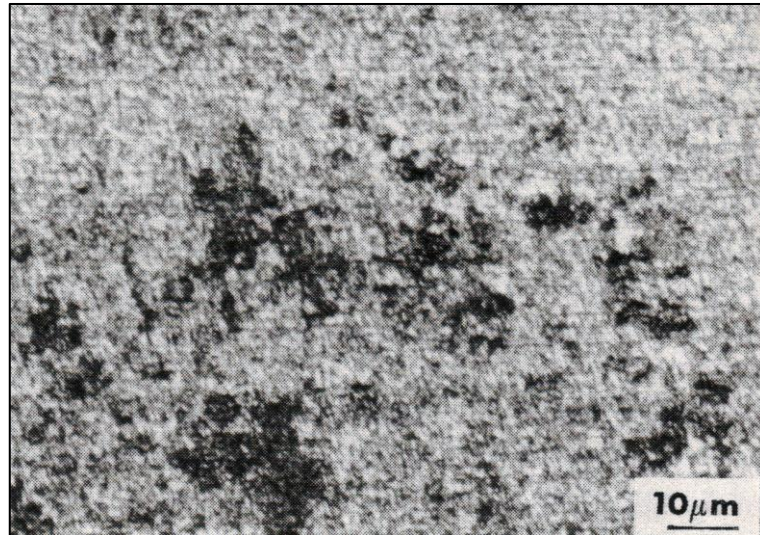


Figura 32: Superfície do topo do trilho abrasada por partículas de areia esmagadas.

Com o movimento de rolamento, o principal mecanismo que domina o comportamento do desgaste é a fadiga. Genericamente, são fadigas na superfície e são formadas por ciclos repetitivos de deformação. A fadiga na superfície envolve a formação e propagação de trincas, a qual em estágio avançado leva a perda de material. Este processo é conhecido com *ratcheting*. As trincas tendem a se formar debaixo da superfície e se propagar na superfície. Entretanto, em casos onde existe a força de tração, as trincas são formadas na superfície. Tração é gerada no contato de rolamento quando o deslizamento ocorre juntamente com o rolamento. O deslizamento é causado devido a resultante de dois componentes movendo-se a diferentes velocidades. O contato roda-trilho é um exemplo clássico da ação rolamento/deslizamento.

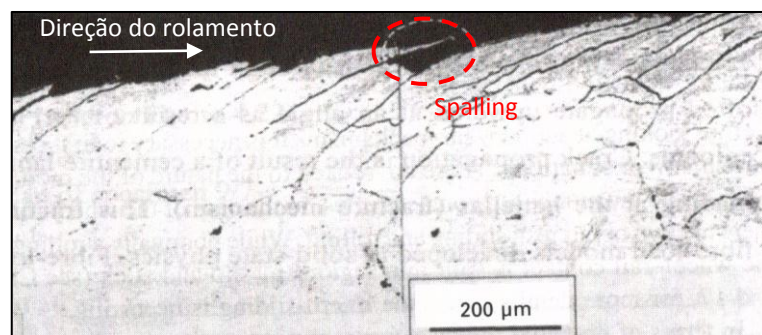


Figura 33: Trincas e perda de material resultante da situação de desgaste por rolamento e deslizamento.

A Figura 33 mostra uma seção de um disco fabricado de aço de trilho que foi rolado contra outro disco feito de aço de roda em um teste de disco duplo para simular as condições de rolamento e deslizamento no contato roda-trilho. Ciclos repetitivos de carregamento levaram a deformação do material da superfície e desenvolveu trincas na superfície (*head checks*), as quais levaram a perda de material (*spalling*). Em casos mais severos, onde as trincas seguem a direção do momento de flexão do trilho, podem causar fratura do trilho.

O desgaste é frequentemente classificado em regime suave ou regime severo. Esta classificação não é baseada em nenhum valor numérico, mas em uma observação geral de qualquer par de materiais. Aumentando a severidade do carregamento ocasiona em algum estágio um notável aumento na taxa de desgaste. As diferenças entre os dois regimes são apresentadas na Tabela 1:

Regime Suave de Desgaste	Regime Severo de Desgaste
Resulta em superfícies extremamente lisas, frequentemente mais que as superfícies originais	Resulta em rugosidade, superfícies profundamente divididas
Limalhas de aço extremamente pequenas, tipicamente 100 nm de diâmetro	Grandes limalhas de aço, tipicamente até 0,01mm de diâmetro

Tabela 1: Regimes de desgaste. (LEWIS & U., 2009)

Os mecanismos de desgaste associados ao regime severo são os mecanismos adesivo e térmico. Aumentando a temperatura do contato que resulta no amolecimento térmico poderá ocasionar a transição para o regime catastrófico de desgaste.

A Figura 34 ilustra os regimes de desgaste relacionando-os com a taxa de desgaste. (LEWIS & U., 2009)

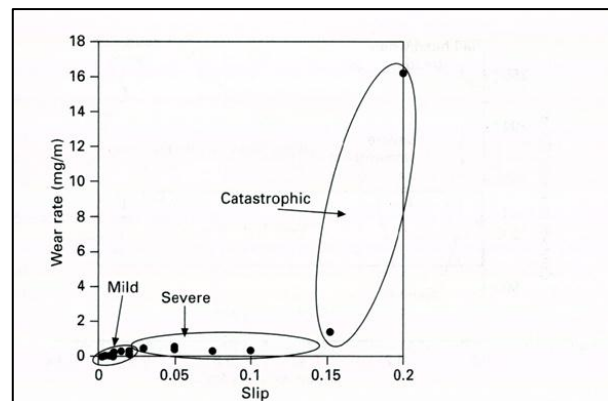


Figura 34: Taxas de desgaste do material de uma roda R8T obtida através do teste *twin-disc*. (LEWIS & U., 2009)

Uma modelagem do desgaste pode ser realizada através da equação de desgaste de Archard, que define o volume do desgaste.

$$V = \frac{kPL}{H}$$

Onde V é o volume de desgaste, P é o carregamento, L é a distância do deslizamento, H é a dureza da superfície do material e k é o coeficiente de desgaste (relacionado com o coeficiente do atrito).

Efeito da metalurgia sobre o desgaste:

(BENSON, 1993) realizou uma revisão da literatura de testes de desgaste de trilhos e rodas para avaliar o efeito da dureza do material nas taxas de desgaste. Em testes laboratoriais um aumento da dureza de um componente em um sistema de desgaste de dois corpos, geralmente diminui o desgaste deste componente. O desgaste do outro componente pode ser ou não afetado,

ou também diminui dependendo da metalurgia e dureza do segundo componente. Entretanto, algumas evidências mostram que o aumento da dureza do trilho causou um leve aumento na taxa de desgaste da roda. (TUNNA, SINCLAIR, & PEREZ, 2006)

A Tabela 2: Tendência das taxas de desgaste roda-trilho. resume as tendências de desgaste da roda e do trilho sob condições *heavy haul*.

Dureza da roda	Dureza do Trilho	Efeito sobre	
		Taxa de desgaste do trilho	Taxa de desgaste da roda
Constante	Aumenta	Diminui	Trilho < 360 HB – diminui
			Trilho > 360 HB – aumenta
Aumenta	Constante	Trilhos carbono – aumenta	Diminui
		Trilhos com boleto tratado - Diminui	

Tabela 2: Tendência das taxas de desgaste roda-trilho. (TUNNA, SINCLAIR, & PEREZ, 2006)

2.8. Fadiga de contato por rolamento – RCF – Rolling Contact Fatigue

Até o final da década de 70 o termo era utilizado somente em centros de pesquisa, principalmente na Inglaterra (British Rail Research Division e Cambridge University) no estudo da formação do *Squat*. (CLAYTON, ALLERY, & BOLTON, 1981)

Entretanto somente a partir de 1997 no 6º Congresso do IHHA, a comunidade ferroviária passou adotá-lo e assim obter o completo entendimento dos mecanismos envolvidos na fadiga de contato por rolamento.

Os defeitos de RCF formam em resposta a milhões de ciclos intensos de contato roda-trilho que repetidamente sobrecarregam a superfície e subsuperfície do material. Com os defeitos superficiais, o ciclo de altas tensões e altas trações causa o escoamento de uma fina camada de metal da superfície do trilho na direção da carga aplicada. Esta camada da superfície sofre endurecimento a frio e posteriormente fratura, iniciando o trincamento da superfície. Estas trincas podem crescer sob os carregamentos subsequentes, ligando-se entre si e formando defeitos de *shelling*. (MAGEL, SAWLEY, SROBA, & KALOUSEK, 2005)

Rolling Contact Fatigue (RCF) é uma família de fenômeno de danos que aparecem nos trilhos devido a excesso de tensão no material do trilho. Estes fenômenos são resultados de repetições de excesso de tensão no material da superfície e subsuperfície do trilho, causado por milhões de intensos ciclos de passagem de rodas. (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)

O termo RCF é genérico e usado para descrever uma grande gama de defeitos, que basicamente são devidos ao desenvolvimento de tensão excessiva de cisalhamento no contato roda-trilho ou em suas proximidades, as quais excedem o limite de cisalhamento do material. (MARICH, 2005).

Os defeitos de RCF ocorrem de várias formas, iniciando-se em qualquer direção na superfície de contato, resultado do efeito combinado de altas tensões de contato e altos níveis de *creepages*, ou ainda, inclusões ou defeitos de fabricação do trilho. (EPP & MUTTON, 2002)

Desde que RCF é um fenômeno decorrente de condições limite, mesmo uma pequena redução nas tensões de contato ou modesto aumento na resistência do trilho, podem dramaticamente reduzir o número de ciclos de contato que promovem a fadiga de contato. (MAGEL, SAWLEY, SROBA, & KALOUSEK, 2005)

Em geral, quando o desgaste é suprimido os danos devido à fadiga são acentuados. Embora excessivo desgaste consome o trilho e a roda, desgaste insuficiente permite a iniciação e propagação da fadiga de contato. (KALOUSEK & MAGEL, 1997)

Se a taxa de desgaste natural for suficientemente baixa de maneira que as trincas de fadiga não são removidas tão rapidamente quanto são formadas, um meio artificial de remoção das trincas precisará ser adotado, como por exemplo, o esmerilhamento. Isto é particularmente importante para trilhos de alta dureza (>340 BHN). (MAGEL, SAWLEY, SROBA, & KALOUSEK, 2005)

A Tabela 3 relaciona os tipos de trilhos conforme a dureza e a resistência ao RCF, onde K é a resistência ao cisalhamento (tensão causadora do RCF).

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

Tabela 3: Classificação de trilho quanto a dureza e a resistência ao cisalhamento (k). (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)

Em termos práticos, quanto maior a dureza do trilho, melhor será a capacidade de resistir às tensões de contato. (KALOUSEK & KLEIN, 1976)

Fadiga em trilhos e rodas pode ser categorizadas em falhas na superfície e subsuperfície, que resultam em iniciação e crescimento de trincas. Fadigas na superfície (Figura 35) podem ocasionar *head checking* ou *squat* e na subsuperfície ocasionam *shelling* e *tache ovale*. (RailCorp, 2009)



Figura 35: Defeitos de RCF.

2.8.1. Head Checks

Head checks ocorrem principalmente nos trilhos externos de curvas apertadas. As trincas iniciam muito perto da superfície do trilho tipicamente 2-5 mm uma das outras e podem crescer até a profundidade de 2-5 mm. (RailCorp, 2009)

As trincas são inclinadas na direção de maior solitação do canto de bitola. Em um estágio severo, ocorre à perda de material da superfície do trilho, essa perda de material é chamada de *spalls*. (RailCorp, 2009)

Head checkings podem ocorrer em curvas apertadas ou em tangentes onde os veículos tendem a exibir o comportamento de *hunting*. (RailCorp, 2009) A Figura 36 e Figura 37 ilustram exemplos de *head check*.

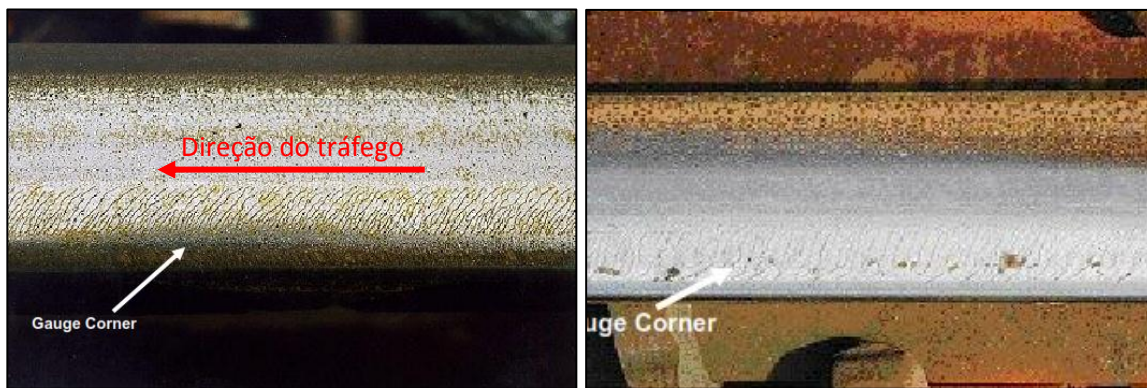


Figura 36: A esquerda estágio inicial de head check e a direita estágio intermediário.



Figura 37: Estágio severo de head checks.

2.8.2. Shelling

É um defeito interno que inicia a uma profundidade de 2-8mm abaixo do canto de bitola, geralmente, nos trilhos externos da curva. É um defeito subsuperficial. (RailCorp, 2009) A aparência do *shelling* é apresentada na figura Figura 38.

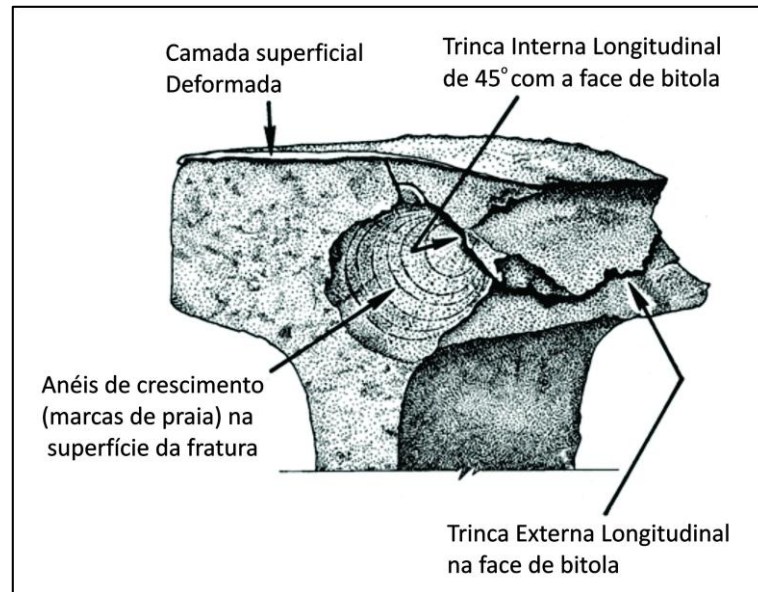


Figura 38: Aparência do defeito de shelling. (LAUFER, GHONEM, KALOUSEK, & STONE, 1982)

O estágio inicial de desenvolvimento do *shelling* inicia-se como *dark spots* (regiões escuras) na região de canto de bitola dos trilhos. Não se formam de maneira regular ao longo do canto de bitola como ocorre com o *head checks*. (RailCorp, 2009)

Shelling (Figura 39) se desenvolve num plano horizontal ou longitudinal consistente com a forma do trilho no canto de bitola. As trinças continuam a crescer na direção longitudinal do plano por alguma distância num ângulo de aproximadamente 10°-30° da superfície do trilho, a partir daí podem transformar em *spall* ou continuar a crescer no plano transversal e senão for detectado a tempo causar a fratura do trilho. (RailCorp, 2009)

A formação do defeito transversal pode ser iniciada pela presença de irregularidades (inclusões) no aço, sem a necessidade da formação de *shelling*. (RailCorp, 2009)

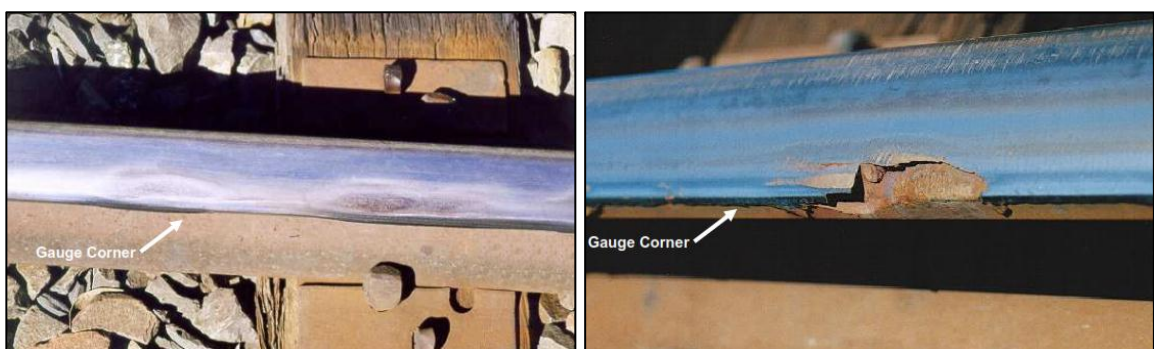


Figura 39: Exemplos de shelling.

2.8.3. Head Check na superfície de rolamento

Este tipo de defeito também é conhecido como *flaking*. Ocorre na superfície de rolamento de trilhos internos e externos. Inicialmente o defeito aparece como um mosaico ou padrão de pele de cobra no boleto do trilho. Nos estágios avançados de crescimento das trinças produz *spalls* que

podem atingir 10-15 mm de largura e até 3 mm de profundidade. Estes defeitos podem proliferar ao longo do comprimento dos trilhos. (RailCorp, 2009)



Figura 40: Exemplo de flaking.

2.8.4. Causas de formação de Head Checks e Shellings

Ambos os defeitos de *head check* e *shellings* são iniciados por altas tensões de cisalhamento que se desenvolvem na região do contato roda-trilho quando as tensões excedem o limite suportado pelo material do trilho. (RailCorp, 2009)

Vários fatores podem influenciar as tensões de cisalhamento: (RailCorp, 2009)

- O carregamento nominal, dinâmico e de impacto, e uma série de fatores que influenciam o carregamento incluindo: geometria da via, característica do truque, irregularidades verticais do trilho e da roda, superelevação, etc.
- Os respectivos raios do trilho e da roda na região de contato e conseqüentemente os perfis característicos da roda e do trilho;
- O diâmetro das rodas (diâmetros menores resultam em maiores tensões)
- As forças de tração e deslizamento (*creep*)

A diferença nas características de iniciação dos defeitos *head check* e *shelling* são em função do coeficiente de tração (T/N) na tensão resultante de cisalhamento.

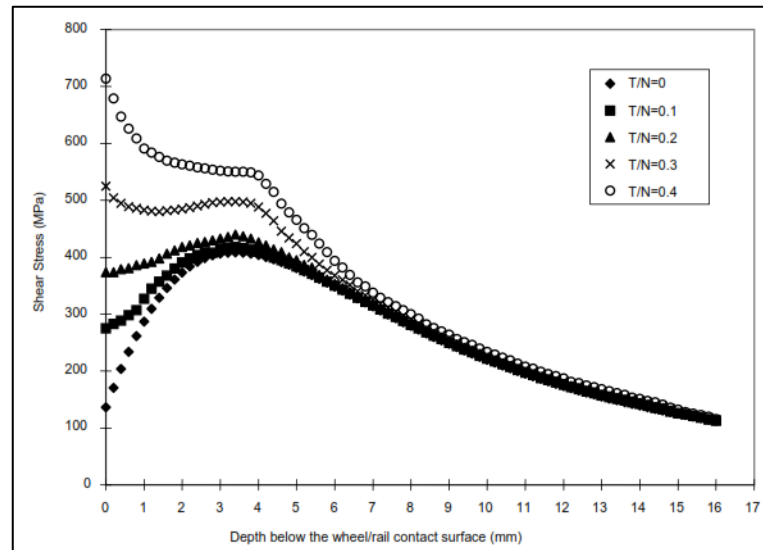


Figura 41: Relação de Tensão de Cisalhamento x Tração x profundidade das trincas. (RailCorp, 2009)

Como mostrado na Figura 41, é evidente que para baixos valores de T/N (até 0,2) a tensão máxima de cisalhamento é obtida a certa profundidade da superfície do trilho, a qual corresponde à região onde geralmente o *shelling* é desenvolvido. Altas cargas por eixo aumentam a força normal e assim reduz o valor de T/N , o qual leva a formação de trincas na subsuperfície dos trilhos.

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

A Figura 42 exemplifica a tensão de cisalhamento em função do coeficiente de atrito. Quando o coeficiente de atrito na superfície é zero, a máxima tensão de cisalhamento é localizada 0.1" abaixo da superfície com amplitude de 53 ksi para uma carga vertical de 19 kips. Entretanto se o coeficiente de atrito atinge 0.5, a máxima tensão de cisalhamento move para perto da superfície e sua magnitude aumenta para 80 ksi. (STEELE & REIFF, 1981)

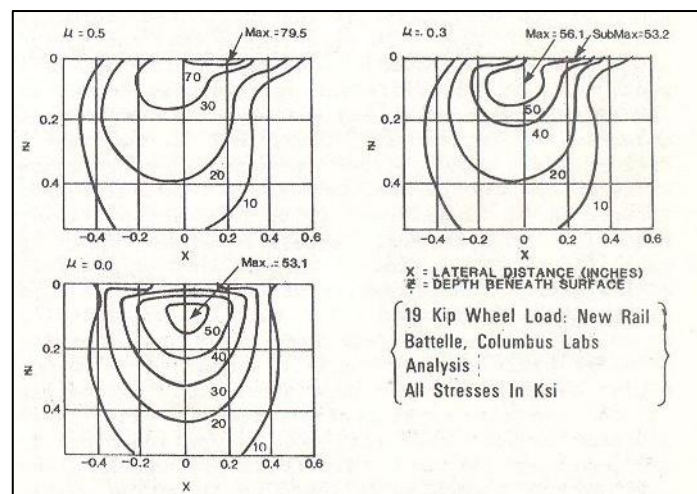


Figura 42: Influência da tração na tensão de cisalhamento. (STEELE & REIFF, 1981)

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

Contaminações na superfície dos trilhos, predominantemente pela água (também lubrificantes nas proximidades dos lubrificadores) podem acelerar a propagação de trincas, tornando-as maiores e profundas.

Em termos de tamanho da trinca, a vida de uma trinca na superfície do trilho sujeita a RFC pode ser dividida em três fases de acordo com a Figura 43.

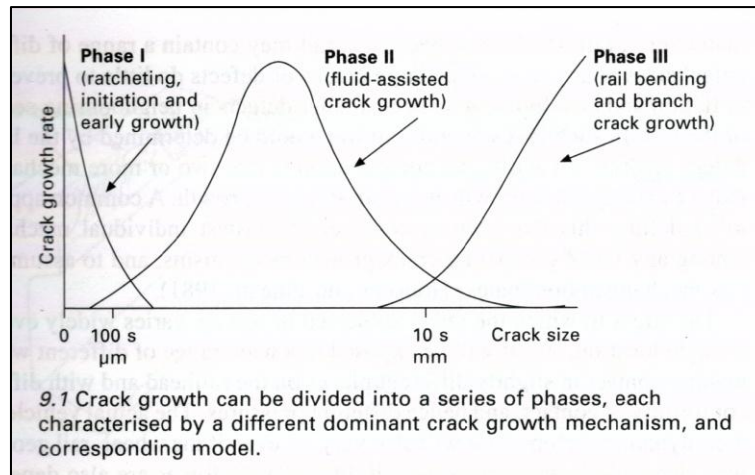


Figura 43: O crescimento das trincas pode ser dividido em fases, cada uma delas caracterizada por diferente mecanismo de crescimento das trincas. (LEWIS & U., 2009)

Na fase I o trilho não possui trincas, ou está iniciando um processo de iniciação das trincas com o crescimento das trincas no estágio inicial, os defeitos irão crescer até o tamanho de centenas de micros. Neste estágio o crescimento das trincas é dominado pelo desenvolvimento de defeitos através de deformação plástica severa, nas camadas próximas à superfície do trilho. O tamanho dos defeitos correlaciona com a profundidade dessas camadas. A transição para segunda fase da vida das trincas acontece quando os defeitos iniciados próximo às camadas superficiais do trilho crescem suficientemente o bastante devido a uma grande quantidade de mecanismos adicionais de crescimento; que a partir deste ponto governam o crescimento. Esses mecanismos são aplicados as trincas de milímetros de comprimento a até dezenas de milímetros. Neste estágio que os mecanismos descritos como um carregamento de compressão (o qual geralmente é esperado fechar as trincas e restringir seu crescimento) podem liderar a propagação das trincas. (LEWIS & U., 2009)

O estágio final de crescimento das trincas é geralmente rápido, à medida que as trincas forem crescendo, são direcionadas pelo bulbo de tensões no trilho, incluindo a tensão de flexão e a tensão residual. Existem modelos para descrever este estágio da vida das trincas nos trilhos. Entretanto, trincas desta dimensão são enormes para serem deixadas nos trilhos e serem gerenciadas, a única solução é a substituição imediata do trilho. (LEWIS & U., 2009)

Durante o processo de crescimento das trincas, a tensão de contato na interface roda-trilho quase sempre guia o desgaste das superfícies como também a iniciação e a possibilidade de propagação das trincas. Esta situação não é sempre desvantajosa, o desgaste natural é capaz de remover o material contendo pequenas trincas antes delas se tornarem perigosas. Entretanto, o

desgaste pode levar a perda do perfil do trilho, assim altera a mecânica do contato da interface da roda-trilho. O desgaste do trilho também produz a mudança na bitola da via, afetando a dinâmica dos veículos, e a excessiva perda da seção transversal do trilho é critério para substituição do trilho. (LEWIS & U., 2009)

A Figura 44 ilustra cada fase de crescimento das trincas em um corte de uma seção transversal do boleto do trilho.

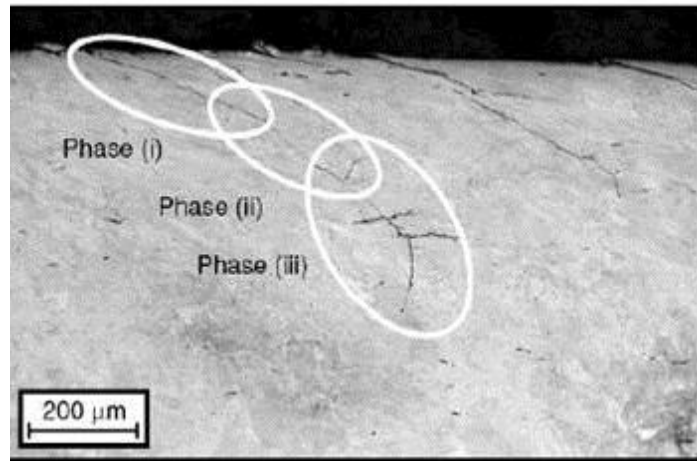


Figura 44: Fases de crescimento de uma trinca na seção transversal do boleto do trilho. (SROBA P. , Rail Grinding - Presentation to VALE, 2012)

Assumindo que as micro trincas já estão desenvolvidas na fase I, dois mecanismos primários existem para a propagação das trincas na fase II, os quais se desenvolvem em um regime de tensão de compressão, e não estão sujeitos ao bulbo de tensões o qual guia o crescimento das trincas na maioria das situações. Primeiramente, mesmo em regime de tensão de compressão, a tensão de cisalhamento pode atuar liderando o crescimento das trincas através do deslizamento das faces da trincas uma contra outra. Como as trincas de head check são mais superficiais que internas, fluidos podem penetrar e auxiliar o crescimento através do mecanismo hidráulico. O segundo mecanismo é a lubrificação das faces das trincas pelo fluido, reduzindo o atrito que poderia restringir o modo de crescimento por cisalhamento. O papel dos fluidos é conhecido através de experimentos e evidências em campo, na maioria dos casos em trincas de head check no canto de bitola. Entretanto, os fluidos não são necessários para a iniciação das trincas, uma vez que o escoamento plástico pode estender a trinca por vários milímetros de profundidade, as trincas superficiais podem se desenvolver sem os fluidos. (LEWIS & U., 2009)

A Figura 45 ilustra quatro tipos de mecanismo de crescimento de trincas (na fase II) assistidos por fluidos, aplicados nas trincas de head check usando o corte da seção transversal do trilho e o contaminante contido na trinca. A ação de cada mecanismo é resumida após a Figura 45.

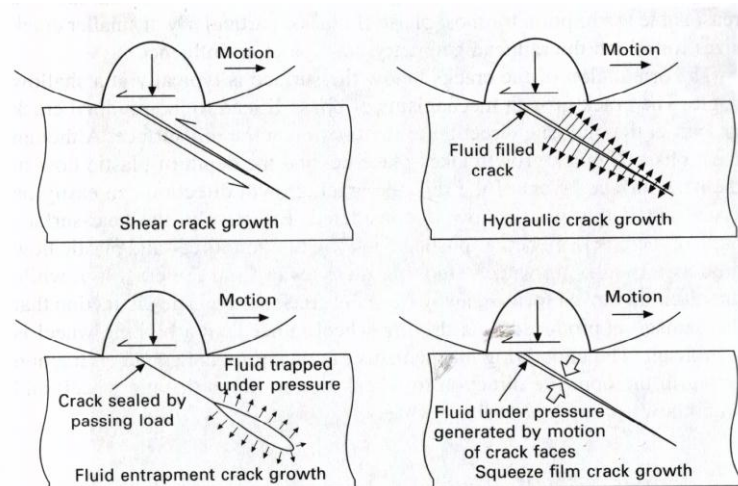


Figura 45: Mecanismo de crescimento das trincas assistidos por fluidos.

1. Crescimento das trincas guiado por cisalhamento: este mecanismo é baseado no ciclo de tensões de cisalhamento das rodas passantes o qual os trilhos são submetidos. Bower (1988) descobriu as previsões de crescimento das trincas por este mecanismo de forma consistente através de forma experimental e experiência com trincas RCF em ferrovias. Porém a propagação por ciclo de cisalhamento foi improvável ao menos que o coeficiente de atrito das faces de típicas trincas fosse menor que 0,2. Na data do estudo de Bower, a evidência experimental foi que o ciclo de carregamento cisalhante resulta rapidamente na formação de ramificações das trincas, quando as trincas foram examinadas notou-se que os head checks propagaram-se até dezenas de milímetros no seu plano original antes de ramificar.
2. Transmissão de pressão hidráulica: a transmissão direta de pressão hidráulica da pressão de contato até as faces da trinca, sem o aprisionamento do fluido na trinca. Foi descoberto por Bower (1988) ser incapaz de explicar o efeito do movimento de carregamento ou a direção do tráfego no crescimento da trinca. Entretanto, o fator de intensidade de tensão prediz que o mecanismo é suficiente para produzir o crescimento da trinca.
3. Aprisionamento do fluido: o fluido selado e comprimido na trinca pelo carregamento das rodas é capaz de aumentar o tamanho das trincas através da alta intensidade de tensão foi descoberto por Bower (1988). O crescimento da trinca é sensível a direção do movimento de carregamento e deve ser observado para prever o crescimento da trinca. Entretanto, a combinação complexa de tensão de tração e cisalhamento na extremidade da trinca torna difícil de prever a direção de crescimento.
4. Ação de espremer o filme do fluido: o mecanismo de lubrificação “squeeze film” (Walker *et al.*, 1969; Bogdanski, 2002a) foi originalmente usado para prever a pressão desenvolvida em componentes de mancais de rolamento e articulações humanas sinoviais como o joelho, nas quais o lubrificante é alternadamente espremido e deslocado contra o vazio da trinca. Quando a trinca é preenchida pelo fluido, altas pressões dentro da trinca serão formadas através das rodas passantes, mesmo se o fluido não estiver selado e aprisionado no interior da trinca. Isto explica o crescimento mesmo em trincas com dimensões maiores que o contato roda-trilho, nesta condição não é possível o crescimento das trincas pelos mecanismos 2 e 3 acima mencionados.

Além da tensão de contato roda-trilho, existem outros fatores que influenciam o crescimento das trincas na fase II que são:

1. Tensão térmica: longitudinal expansão e contração dos trilhos longos soldados, onde as tensões longitudinais poderão ser desenvolvidas com a variação da temperatura. A tensão térmica pode variar $2,5 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$ quando a temperatura do trilho se afasta ou aproxima da temperatura neutra.
2. Tensão residual: dois tipos de tensão residual afetam os trilhos. O primeiro tipo é aquela tensão introduzida no trilho durante o processo de fabricação, particularmente durante a fase de desempeno e alinhamento (roller straightening) das barras de trilho cuja típica distribuição é mostrada na Figura 46. O segundo tipo é a tensão residual proveniente do escoamento plástico do aço do trilho próximo à superfície de contato durante a passagem das rodas. As tensões desenvolvidas são parte do processo de Shakedown (relativo ao endurecimento a frio) e geralmente protege o material de adicionais deformações plásticas. A taxa de escoamento plástico cai rapidamente com a passagem das rodas.

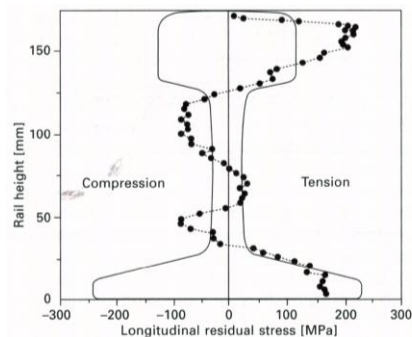


Figura 46: Distribuição interna típica de tensão residual.

3. Tensão de Flexão: o modelo mais simples de modelagem do modo de flexão do trilho assume que o trilho é uma viga suportada por um apoio continuamente elástico e é conhecido como modelo de Winkler. Este modelo e outros mostram que a flexão do trilho é acompanhada por uma tensão longitudinal de tração que se desenvolve de acordo com Figura 47. O momento de flexão longitudinal no trilho é de aproximadamente 4000 Nm .

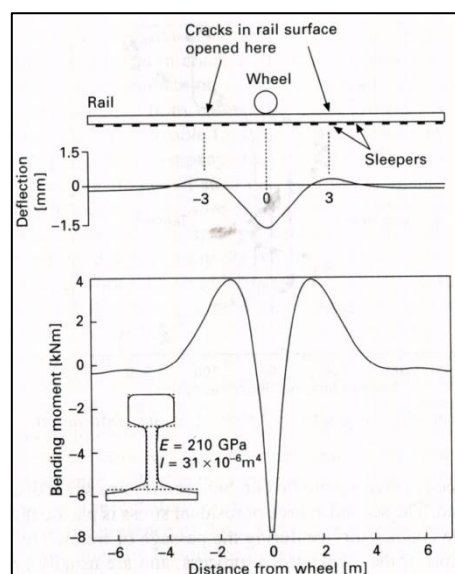


Figura 47: Representação sistemática da flexão do trilho.

Embora na maioria dos casos estas tensões adicionais são relativamente pequenas em relação às pressões de contato, elas têm um considerável efeito quando agem simultaneamente com as tensões de contato, sendo suficiente para permitir que as faces das trincas deslizem uma sobre a outra. (LEWIS & U., 2009)

A Figura 48 explica porque as trincas de RCF são frequentemente observadas nos trilhos externos das curvas, e conduz a hipótese que os danos de RCF nas rodas são causados quando a roda está passando sobre o trilho interno. (TUNNA, SINCLAIR, & PEREZ, 2006)

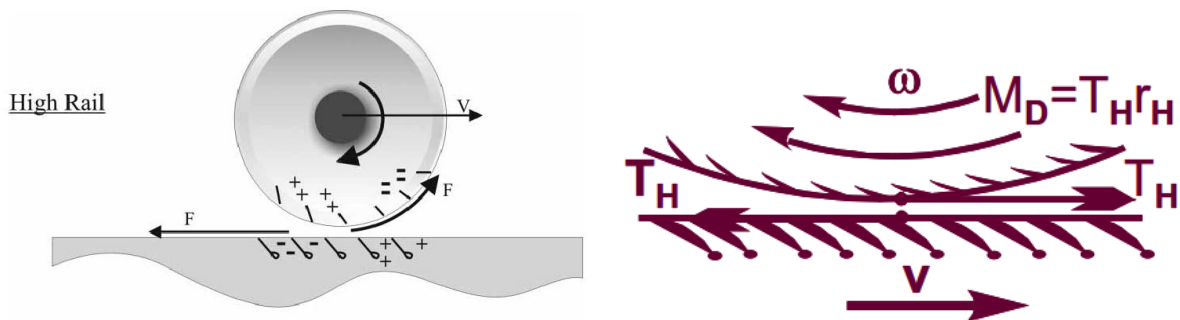


Figura 48: Orientação das trincas na roda e no trilho externo. (TUNNA, SINCLAIR, & PEREZ, 2006) e (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)

De acordo com a orientação das trincas na Figura 48, as trincas no canto de bitola do trilho externo (observe os pontos na extremidade interna das trincas, significam água) irão sofrer a propagação hidráulica e geralmente serão mais severas que as trincas no lado de campo do trilho interno. Esta situação é observada em curvas suaves no campo. (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)

A mesma explicação é aplicada para a maior frequência de trincas no lado de campo do que na raiz do flange nas rodas (Figura 49). Em virtude das forças de creepage, que causam o deslizamento da roda interna no topo do trilho, a água terá caminho livre para penetrar nas trincas da roda e causar a propagação hidráulica. Já no topo do trilho interno a água será expulsa das trincas devido a orientação destas. (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)

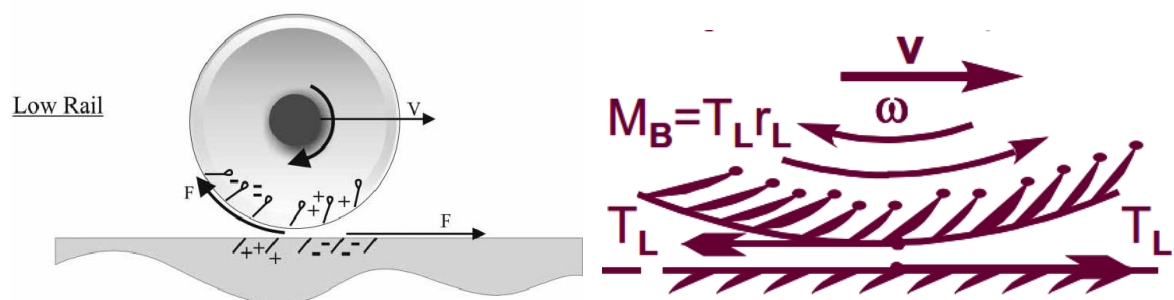


Figura 49: Orientação das trincas na roda e no trilho interno. (TUNNA, SINCLAIR, & PEREZ, 2006) e (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)

O desenvolvimento de defeitos de *head check* pode ser exacerbado por um número de fatores que reduzem o desgaste do trilho e conseqüentemente permite as trincas de fadiga de crescerem, em vez de o trilho ser consumido por desgaste, incluindo:

- Curvas de raio suave
- Efetiva lubrificação
- Trilhos de elevada dureza e resistência
- Perfis de trilhos e rodas projetados para minimizar o desgaste.

2.8.5. Squats

Squats são defeitos de RCF iniciados na superfície do trilho que ocorrem preferencialmente em seções de via tangentes e curvas abertas. São facilmente identificados pela aparência, a qual é caracterizada por uma área escura no trilho. A área escura é em função das trincas subsuperficiais que reduzem a integridade da material do trilho e afunda a superfície do trilho (criando uma depressão), onde limalhas de aço (black iron oxide) se acumulam. Por esse motivo, squats são frequentemente conhecidos como dark spots. Cada squat é constituído de duas trincas, a trinca guia é aquela que se propaga na direção do tráfego; e a trinca secundária propaga no sentido oposto ao tráfego. A trinca guia é muito maior que a trinca secundária e possui numerosas ramificações. (GRASSIE & KALOUSEK, Rolling Contact Fatigue of Rails: Characteristics, Causes and Treatments, 1993)

Squats devem ser removidos nos estágios iniciais de desenvolvimento, caso contrário podem reduzir a vida útil do trilho em 25% . (DEROCHE, BETTEMBOURG, & PRASIL)



Figura 50: Exemplo de Squat.

As etapas do desenvolvimento do defeito de *squats* são apresentadas na Figura 51.

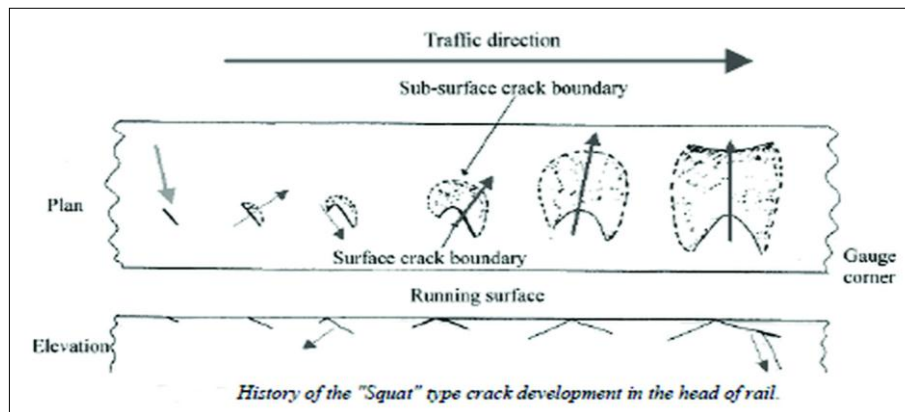


Figura 51: Etapas do desenvolvimento do Squat no topo do trilho. (BOGDANSKI & LEWICKI, 2006)

Segundo (RailCorp, 2009), squats são indicados por uma área escura na banda de rodagem, a qual resulta em uma depressão na superfície do trilho, a área não é polida pela passagem das rodas. Existem duas categorias de squats que ocorrem comumente:

- Squat na banda da rodagem: é iniciado por efeito térmico da tração associado com algum micro deslizamento das rodas, e podem ocorrer em qualquer lugar na banda de rodagem.(Figura 52)
- Squat na face de bitola: é iniciado através de trincas pré-existentes, usualmente RCF e estão localizadas usualmente, mas não sempre, perto do canto de bitola, em trilhos externos de curvas e AMV's.(Figura 53)

Squats moderados são confundidos com patinados (wheelburn defects). O que caracteriza a diferença é:

- squats se desenvolvem gradualmente em um período de meses ou anos, enquanto que patinados ocorrem instantaneamente após o incidente de deslizamento da roda
- squats frequentemente ocorrem em apenas uma fila de trilho, o patinado ocorre em ambos os trilhos

O principal mecanismo de formação do *squat* é associado a esforço trator das rodas de locomotivas, deste modo o limite de ductilidade é exaurido, fenômeno conhecido como *ractheting*, desenvolvendo micro trincas na banda de rodagem do trilho. Os mecanismos de propagação são idênticos aos *head checking*. (GRASSIE & KALOUSEK, 1993)

Outro mecanismo de formação do *squat* proposto por pesquisadores japoneses e australianos, é que o mecanismo de iniciação das trincas é iniciado em uma camada de martensítica (*white etching*) na superfície do trilho. A camada martensítica é extremamente dura e frágil, e sobre a ação da carga das rodas provoca a formação de trincas no substrato perlítico do trilho. (GRASSIE & KALOUSEK, 1993)



Figura 52: Defeito de squat na banda de rodagem do trilho.



Figura 53: Squat em AMV's.

Squats foram os primeiros defeitos de RCF reconhecidos na Inglaterra. São frequentemente associados à corrugações, soldas defeituosas. Eles se tornaram crônicos nos anos 70 quando houve a substituição dos dormentes de madeiras para dormentes de concreto (para início de operações do trem HST), aumentando a rigidez da linha. A incidência do aparecimento do squat reduziu drasticamente com a introdução do processo de lingotamento contínuo. (Rail Safety & Standards Board, 2006)

O processo de lingotamento contínuo (*continuous casting*) é um melhoramento de processo que resulta em baixos teores de impurezas e inclusões, garantindo a característica “*steelcleanlines*”.

Até 1997 *squats* não eram encontrados em linhas *heavy haul* na América do Norte, Austrália e outros, devido principalmente à baixa quantidade de eixos tratores, altas taxas de desgaste e prática de esmerilhamento de trilhos, que removiam locais de iniciação de trincas no topo do trilho. Entretanto, em 2012, com o emprego de locomotivas de alto esforço trator (4400 HP/AC), perda de ciclos de esmerilhamento de trilhos, e prolongada permanência trilhos antigos (*dirty rails*) na linha propiciou a ocorrência de *squats* também nas linhas *heavy haul*, como ilustra a Figura 54, Figura 55 e Figura 56.



Figura 54: Severo squat em linha heavy haul.



Figura 55: Severo squat em solda flash-butt.



Figura 56: Severo squat múltiplo.

2.9. Corrugações

Corrugação são irregularidades na superfície de rolamento dos trilhos que aparecem de forma repetitiva (periódica) ao longo de seu comprimento. Elas aparecem como ondulações ou descontinuidades regularmente espaçadas na superfície do trilho. Essas ondulações não são uniformemente espaçadas, porém tendem a variar em torno de um comprimento de onda médio. (SANTORO, 2004)



Figura 57: Corrugação “Short Pitch” típica em linha de trem metropolitano.

As corrugações são classificadas de acordo com o tamanho das ondas, ou seja, distância longitudinal entre pico a pico (ou vale a vale) e sua amplitude (altura vertical entre os picos).

Classificação da corrugação quanto ao tipo: (RailCorp, 2009)

A corrugação em trilhos possui dois tipos básicos:

- ✓ Corrugação de onda longa (*long pitch corrugation - Heavy Haul*) ~ 150/300mm de comprimento de onda.

Geralmente se desenvolve sob altas cargas por eixo (> 20 t) e trens com velocidade baixa e uniforme. A amplitude desta corrugação atinge a faixa de 0,10 até acima de 2,0mm, e pode ser ainda variável (Figura 59). O mecanismo que define a periodicidade do defeito (onda) é a ressonância P2 iniciada por soldas, juntas ou outras irregularidades na superfície do trilho. Ocorrem principalmente nos trilhos externos das curvas, podem ocorrer também em outro local. O mecanismo de dano deste tipo de corrugação é o escoamento plástico.

- ✓ Corrugação de onda curta (*short pitch corrugation - Light axle loads*) ~25/90mm de comprimento de onda.

Geralmente se desenvolve sob baixa carga por eixo (< 20 t). A amplitude desta corrugação é usualmente abaixo de 0,20 – 0,30mm. Vários tipos são descritos, porém as características básicas de comprimento da onda são as mesmas (Figura 57). O mecanismo que define as características da periodicidade do defeito (onda) é usualmente relacionado com a frequência natural das rodas, rodeiro ou fixação. Geralmente ocorre em curvas apertadas onde a relação tração/*creepage* torna saturada. O mecanismo de dano deste tipo de corrugação é o desgaste.

Em termos de criticidade na geração de efeitos nocivos pela corrugação tais como:

- a) aumento nas cargas dinâmicas e de impacto no contato roda/trilho;
- b) danos nos constituintes da via permanente (fratura em dormentes de concreto, destruição de isoladores e palmilhas, pulverização do lastro de pedra);
- c) danos nas rodas, na suspensão, avaria nos rolamentos e em outros componentes do truque;
- d) e finalmente drástico aumento do nível de ruído e redução do conforto para os usuários e populações próximos da via.

Classificação da corrugação quanto à criticidade: (RailCorp, 2009)

Quanto ao fator criticidade a corrugação em trilhos pode ser classificada em cinco categorias (velocidade moderada dos trens < 100 km/h):

- Categoria 1: Corrugação Negligenciável - tipo *Short Pitch* com amplitude < 0,10mm.
- Categoria 2: Corrugação Suave - tipo *Short/Long Pitch* com amplitude entre 0,10/0,30mm. Mas o efeito adverso de geração de ruídos poderá aumentar a severidade para a categoria 3.
- Categoria 3: Corrugação Moderada - tipo *Long Pitch* com amplitude abaixo de 0,50mm.
- Categoria 4: Corrugação Severa - tipo *Long Pitch* com amplitude entre 0,50/1,50mm.
- Categoria 5: Corrugação Muito Severa – tipo *Long Pitch* com amplitude >1,50mm.

As corrugações da Categoria 1 a 3 (Negligenciável a Moderada) poderão ser removidas por esmerilhamento de retificação.

As corrugações da Categoria 4 (Severa) requer considerável esforço de esmerilhamento. Cerca de 40 passes em esmeriladora de médio porte (18 rebolos de 10 HP/motor), ou até 8/12 passes em esmeriladora de grande porte (48/32 rebolos 30/20 HP/motor).

As corrugações da Categoria 5 (Muito Severa) justifica a substituição dos trilhos afetados em vez da sua correção por esmerilhamento.

A Figura 58 mostra a superfície de rolamento de um trilho interno afetado por corrugação enquanto a superfície do trilho externo não apresenta corrugação.

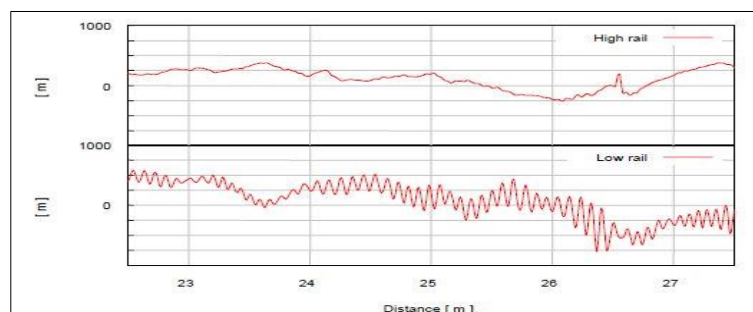


Figura 58: Superfície de rolamento dos dois trilhos onde apenas o trilho Interno possui corrugação.

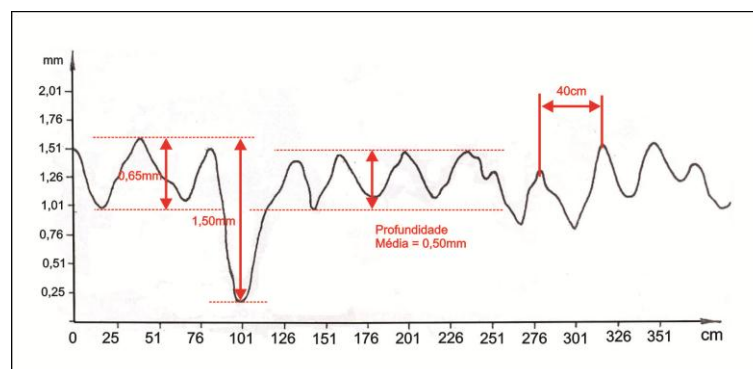


Figura 59: Amplitude e comp. de onda de corrugação tipo Long Pitch.

Quando o contato roda-trilho trabalha nas proximidades do *creepage* saturado, a roda rola para frente enquanto a força de tração atinge o valor máximo da curva tração/*creepage*.

Uma vez alcançado o valor máximo, a força de tração não pode ser aumentada, em razão da característica do atrito negativo, e o deslizamento ocorre.

Esse ciclo de eventos no ponto de contato é conhecido como oscilação *roll-slip* (*Stick-slip*) da força de tração na interface roda-trilho (Figura 60). Tais oscilações podem preceder e iniciar o desenvolvimento de corrugação na superfície do trilho e da roda.

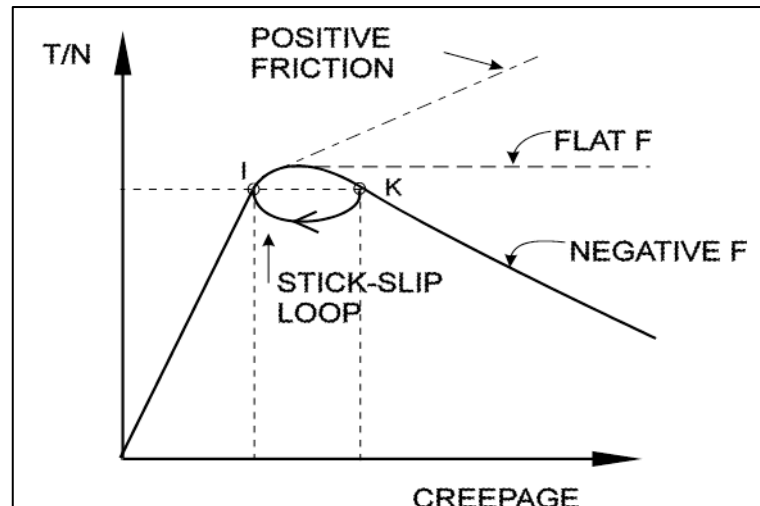


Figura 60: Fenômeno Stick-slip.

Roll-slip pode facilmente ser observada nas superfícies dos trilhos e rodas de composições movendo-se lentamente.

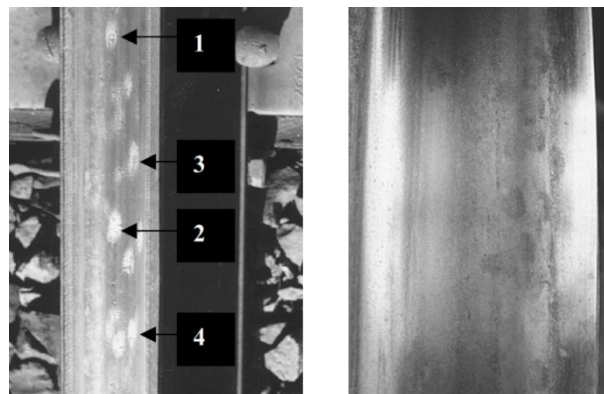


Figura 61: Visualização no trilho e na roda da ocorrência do stick-slip.

A Figura 62 mostra a complexidade do mecanismo de formação da Corrugação.

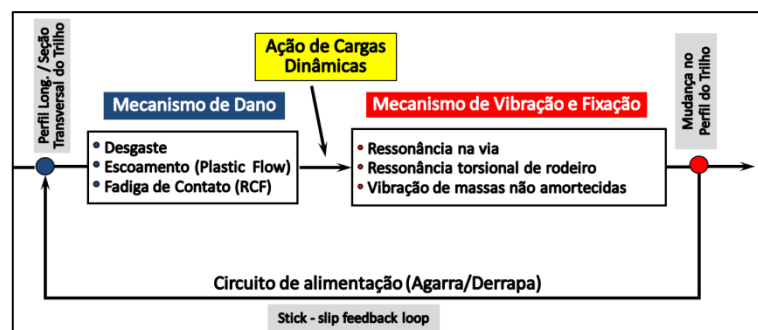


Figura 62: Mecanismo de formação da Corrugação. (KALOUSEK & GRASSIE, 1993)

2.10. Adesão (LEWIS & U., 2009)

No contexto ferroviário, o termo adesão pode ser usado para definir o atrito disponível para transferir forças tangenciais entre a roda tracionada e o trilho. Geralmente, a palavra tração é usada para rodas tracionadas e adesão é usada para rodas quando o freio é aplicado, mas neste trabalho o termo adesão se refere a ambas as situações. A adesão disponível é limitada pelo coeficiente de tração. Se uma roda tracionada aplica uma força maior que esse limite, a rotação da roda irá causar um defeito severo no trilho (patinação ou *Wheel burn*).

A manutenção de uma boa adesão no contato roda-trilho é imperativo para a segurança, eficiente e confiável para operação ferroviária. Na frenagem dos trens a adesão é claramente identificada como uma questão de segurança, na tração é uma questão de desempenho, patinação de rodas pode gerar atrasos. Um ótimo controle do nível da adesão poderá gerar economia, pois reduzirá o consumo de combustível.

A área de contato entre a roda e o trilho pode ser dividida em duas regiões, região sem deslizamento (*stick*) e região com deslizamento (*slip*) como mostrado na Figura 15. Deslizamento longitudinal e forças tangenciais (tração) surgem devido ao escorregamento que ocorre na região posterior do contato. Com o aumento da tração, a região de deslizamento aumenta e a região de sem deslizamento diminui, resultando em um contato com rolamento e deslizamento. Quando as forças de tração atingem o valor máximo, valor de saturação, a região sem deslizamento desaparece e toda área do ponto de contato entra no estado puro de deslizamento. O valor máximo do nível de tração depende da capacidade do contato de absorver a tração, esta capacidade é expressa na forma de coeficiente de atrito ($\mu=T/N$). Usualmente a tração na roda e no trilho atinge o nível máximo em níveis de deslizamento (*creep levels*) de 0,01-0,02.

A curva de tração-*creep* (Figura 19) pode ser dramaticamente afetada pela presença do terceiro corpo na interface roda-trilho.

2.11. O atrito

Atrito é a força que resiste ao movimento relativo entre superfícies sólidas. É a resistência encontrada quando um corpo move-se contra outro. Coeficiente de atrito é a relação adimensional entre a força de atrito entre dois corpos e a força normal que comprime estes corpos.

Para corpos deslizantes, a força de atrito e o coeficiente de atrito (T/N) dependem de três mecanismos diferentes: deformação das asperidades, adesão entre as superfícies deslizantes e das irregularidades causadas por partículas duras e ásperas (Suh and Sin. 1981).

Para a maioria dos pares de metal, o máximo valor do coeficiente de atrito varia de 0.3 a 1.0 (Czichos, 1992).

O atrito gerado pelo rolamento entre duas superfícies não lubrificadas é consideravelmente menor que o atrito de deslizamento das mesmas superfícies (Harris, 1992).

O atrito entre a roda e o trilho representa uma significativa perda de energia, adicionando resistência ao movimento que gera um adicional esforço trator. A perda de energia é manifestada no consumo de combustível, no desgaste e nas superfícies de contato da roda e do trilho. Como exemplo um trem longo de carga para transpor um quilômetro de via gera 600-700 gramas de material proveniente de trilho e roda através do processo de desgaste e deformação plástica que é consequência do atrito. (IHHA, 2009)

A adição de um lubrificante para um contato sólido-sólido irá reduzir significativamente o atrito. O atrito reduzido leva a um desgaste menor, menor geração de calor e perda de energia - que reduz os custos de operação e tempo de inatividade. A principal função de um lubrificante é fornecer proteção para partes móveis - o que reduz o atrito e o desgaste.

Inadequado atrito causa problemas de adesão e frenagem, que afeta a segurança, pois aumenta a distância de parada. Inadequado atrito também é um problema de desempenho, pois afeta a tração e assim limita a força tangencial que é desenvolvida em curvas. (LEWIS & U., 2009)

Aceleração e frenagem usualmente requerem um coeficiente de atrito de 0,2. O atrito entre a roda e o trilho é responsável por diversos processos que ocorrem na interface roda-trilho como RCF, corrugação e geração de ruídos. Se o coeficiente de atrito é muito alto, a maioria dos defeitos superficiais irá ocorrer frequentemente. Coeficiente de atrito em torno de 0,4 aumenta a chance de fadiga na superfície do trilho e da roda. (LEWIS & U., 2009)

O coeficiente de atrito diminui quando a umidade relativa aumenta. (LEWIS & U., 2009)

Para diminuir o atrito, utilizamos a lubrificação, que introduz um filme que protege as duas superfícies em contato.

A espessura do filme de fluido determina o regime de lubrificação (Figura 63), ou o tipo de lubrificação. Os regimes básicos de lubrificação filme-fluido são:
 Lubrificação hidrodinâmica (*HD*) – duas superfícies são separadas por um filme líquido,
 Lubrificação Elastohidrodinâmica (*EHD*) – 2 superfícies são separadas por uma película muito fina de fluidos,
 Lubrificação mista (*Mixed*) – duas superfícies são separadas em parte por um fluido, em parte em contato,
 Lubrificação limite (*Boundary*) – duas superfícies em sua maioria estão em contato uns com os outros apesar de um fluido está presente.

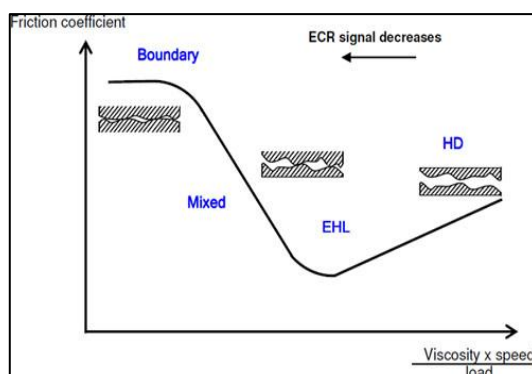


Figura 63: Regimes básicos de lubrificação.

Em uma lubrificação 100% efetiva o desgaste é reduzido a valores próximos de zero. Uma película de lubrificante espessa é formada na região do flange das rodas e face de bitola dos trilhos, temos uma lubrificação hidrodinâmica.

Como a lubrificação tende a reduzir o atrito entre as superfícies, quanto menor o coeficiente de atrito (μ) melhor é a lubrificação e conseqüentemente menor será o desgaste.

Portanto para a lubrificação da face de bitola o ideal é $\mu < 0,25$. A Tabela 4 relaciona o coeficiente de atrito com a qualidade da lubrificação. (IHHA, 2009)

Classificação da Lubrificação	Coeficiente de Atrito	Descrição
Seco	0,35 a 0,57	Sem graxa na face de bitola.
Lubrificação Pobre	0,30 a 0,35	10% a 40% de graxa na face de bitola.
Lubrificação Aceitável	0,25 a 0,30	40% a 60% de graxa na face de bitola. Metal ainda é visível através do lubrificante.
Lubrificação Boa	0,20 a 0,25	60% a 90% de graxa na face de bitola.
Lubrificação Ótima	0,15 a 0,20	100% de graxa na face de bitola. Graxa ainda fresca e úmida.
Lubrificação Excessiva	<0,15	Boleto do trilho coberto por um filme de lubrificante.

Tabela 4: Relação do COF e qualidade de lubrificação. (FROHLING, KOKER, & AMADE, 2007)

Os níveis de atrito recomendado pela (AREMA, 2009) são:

- Face de bitola em curvas: $\mu < 0,20$
- Canto de bitola em curvas: $\mu < 0,20$
- Topo do trilho em tangentes e curvas: $0,30\mu - 0,40\mu$
- A diferença máxima entre o topo do trilho esquerdo e direito: $\mu < 0,1$

2.12. O terceiro corpo

Segundo (BERTHIER, DESCARTES, BUSQUET, NICCOLINI, DESRAYAUD, & BAILLET, 2003) o terceiro corpo é uma camada inerente à interface roda-trilho, presente entre a roda e o trilho. Ele é formado por contaminantes climáticos como, folhas, água e gelo, contaminantes operacionais, tais como: britas do lastro, areia, óleos lubrificantes e contaminantes provenientes de produtos transportados como cereais, minério de ferro e carvão. No caso da interface roda-trilho, a camada do terceiro corpo é formada por duas camadas, uma proveniente do trilho e outra da roda, juntas elas formam a camada do terceiro corpo (Figura 64).

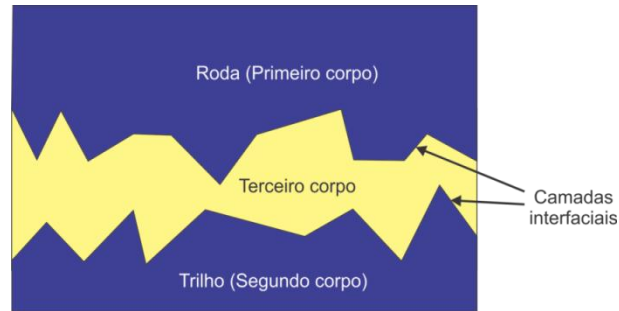


Figura 64: Representação esquemática do terceiro corpo.

A vista perspectiva metalográfica da seção transversal da superfície de rolamento do trilho (Figura 65), revela o terceiro corpo com a espessura de 15 μm .

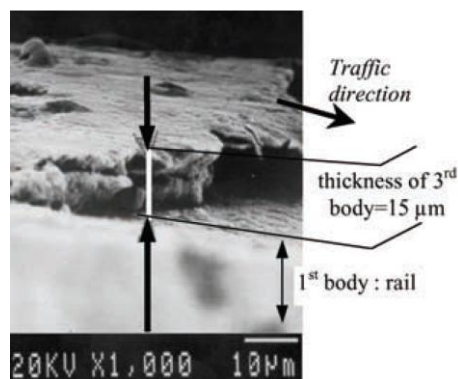


Figura 65: Perspectiva metalográfica da seção transversal da superfície de rolamento do trilho

A camada do terceiro corpo presente no trilho e na roda não é necessariamente contínua e suave. Esta camada pode ser formada, deformada, expulsa e reconstruída devido às interações entre a roda e o trilho no ponto de contato.

A Tabela 5 mostra os contaminantes do terceiro corpo que afetam o coeficiente de atrito.

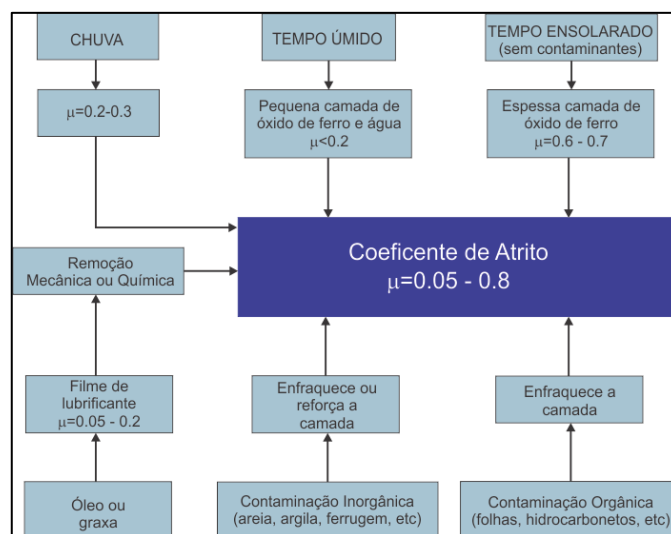


Tabela 5: Ação dos contaminantes no terceiro corpo.

O terceiro corpo da interface roda-trilho é representado pelo modelo bathtub (*bathtub model*) onde as entradas do modelo como por exemplo o constante desgaste, a variação do tráfego,

as intempéries, partículas de sapatas de freios, areia e modificadores de atrito; juntamente com as saídas do modelo, como por exemplo partículas sólidas, reações químicas; governam o tamanho da camada e conseqüentemente o coeficiente de atrito (Figura 66).

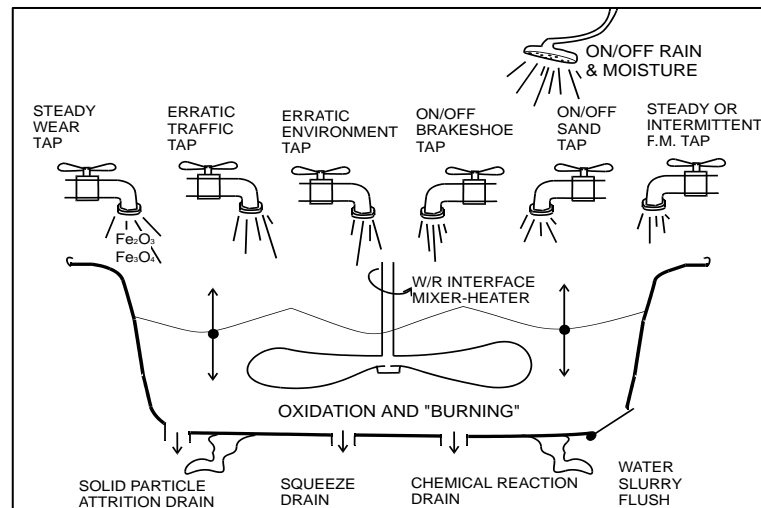


Figura 66: Modelo Bathtub do terceiro corpo.

Mesmo na ausência de contaminantes, o nível do coeficiente de atrito no topo do trilho pode variar de 0,2 ao 0,8. Essas diferenças têm um impacto significativo no desempenho do sistema. Um dos objetivos da tecnologia de gerenciamento do atrito é superar e minimizar essas variações impostas pela natureza. (EADIE, BOVEY, & KALOUSEK, 2002)

Os maiores componentes do terceiro corpo são sub-microns partículas provenientes do desgaste. As superfícies destas partículas são óxidos de ferro. Diferentes fórmulas químicas do óxido de ferro tem diferente comportamento friccional. Além disso, as fórmulas químicas variam de acordo com as intempéries. Essas sutis diferenças são imperceptíveis aos olhos humanos. Magnetita ou óxido de ferro escuro (*black iron oxide*) possuem o maior atrito da família de óxidos. Essa fórmula é dominante em climas quentes e secos, e pode gerar coeficientes de atrito até 0,8. A lama formada por limonite (tipo de óxido de ferro) pode gerar coeficiente de atrito de 0,2. (EADIE, BOVEY, & KALOUSEK, 2002)

Capítulo 3 - Gerenciamento do Atrito

No meio ferroviário o termo Gerenciamento do Atrito significa controlar o coeficiente de atrito existente no contato roda-trilho para atingir valores mais apropriados para a operação ferroviária, obtendo menores taxas de desgaste, forças laterais em curvas e economia de combustível. (SROBA, OLDKNOW, DASHKO, & RONEY, 2005)

O gerenciamento do atrito é uma área fundamental para a otimização em uma ferrovia, pois abrange ao mesmo tempo, três áreas cruciais dentro da operação ferroviária: custos, segurança e meio ambiente.



Os objetivos de uma estratégia de gerenciamento do atrito segundo (SROBA, OLDKNOW, DASHKO, & RONEY, 2005), são:

- Lubrificação da face de bitola do trilho para minimizar o atrito, o desgaste e a resistência de curva.
- Fornecer um intermediário coeficiente de atrito no topo do trilho sobre os veículos rebocados, para controlar as forças laterais em curvas e a resistência ao rolamento em tangentes e curvas.
- Melhorar a tração sobre as rodas das locomotivas (e situação de frenagem de emergência) através de enrijecedores de tração. A areia é amplamente usada para aumentar a adesão, porém outros produtos também podem ser usados como a alumina (usado no trem de alta velocidade japonês) e bastões sólidos.

Para controlar o atrito na interface roda-trilho teremos que agir em duas regiões distintas de acordo com o traçado da via (Tabela 6):

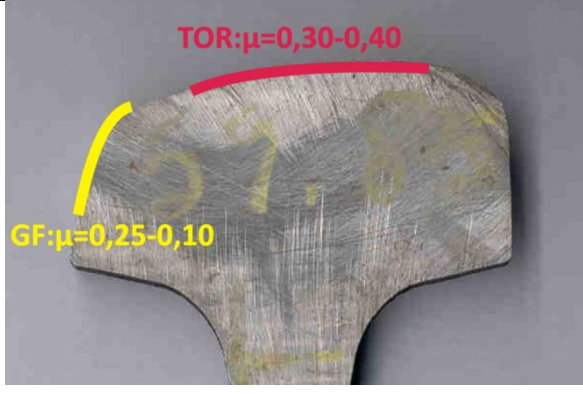

Seções de via em curva	Seções de via em tangente
Face de bitola do trilho externo e topo de ambos os trilhos	Topo de ambos os trilhos
	

Tabela 6: Níveis de atrito ideais no contato roda trilho.

O controle do atrito em duas regiões distintas requer o uso de dois materiais distintos. Na face de bitola dos trilhos externos (de roda) para manter o coeficiente de atrito menor que 0.25, usamos lubrificantes. No topo do trilho externo e interno para manter o coeficiente de atrito entre 0.30 e 0.40 usamos modificadores de atrito. A Tabela 6 ilustra os coeficientes de atrito na interface roda trilho.

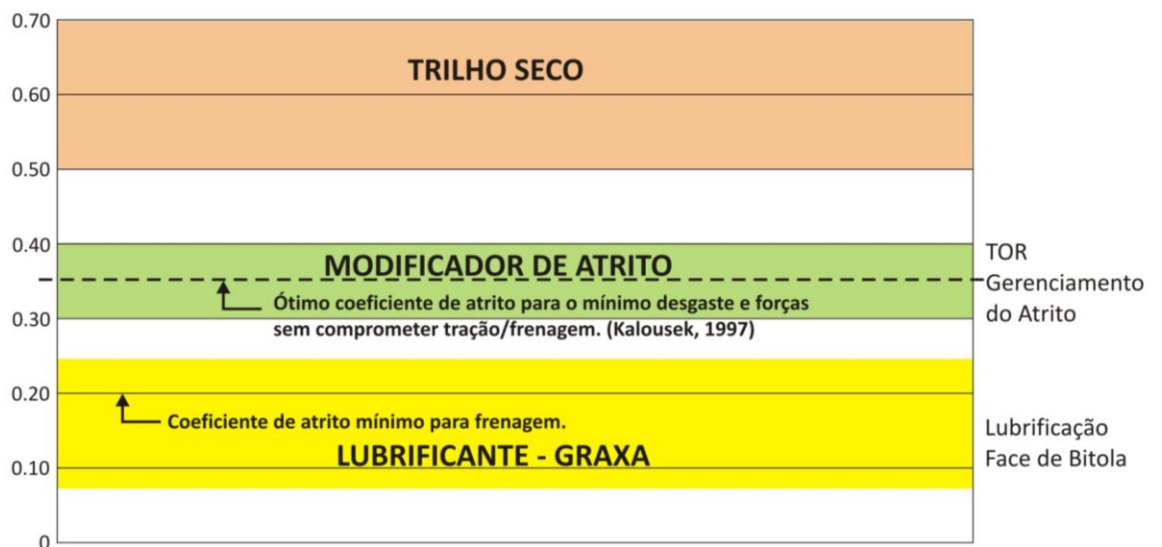


Figura 67: Coeficientes de atritos ideais. (KALOUSEK J. , 1997)

Segundo (RONEY, EADIE, OLDKNOW, SROBA, CALDWELL, & SANTORO, 2009) as características chaves do programa de gerenciamento do atrito são:

- Implantação em larga escala (grande extensão de linha);
- Efetiva Lubrificação Face de Bitola;
- Efetivo Controle do Atrito de Topo de Trilho;
- Monitoramento Remoto de Desempenho no campo das unidades de aplicação GF e TOR;
- Sistema de manutenção, reparação, abastecimento e gerenciamento;

- Verificação do desempenho para assegurar que os resultados esperados estão sendo obtidos.

Com todos esses componentes nos seus devidos lugares, é esperado um mais efetivo e consistente controle de atrito no contato roda/trilho seja alcançado. Isto, por sua vez, levará a uma já comprovada maior economia de custos.

De acordo com (EADIE D. , 2010), os benefícios do controle do atrito na interface roda-trilho são descritos na Figura 68 de acordo com a área de atuação:



Figura 68: Benefícios do gerenciamento do atrito na face de bitola. (EADIE D. , 2010)

O principal propósito do gerenciamento do atrito é estender a vida útil de trilhos e rodas mediante a redução de forças e desgastes.

A tecnologia de gerenciamento do atrito pode ser o controle do atrito somente na face de bitola ou o controle simultâneo do atrito na face de bitola e topo do trilho. O uso da tecnologia nos diferentes locais do boleto do trilho depende entre outros fatores, do traçado da via e do volume de tráfego. Porém o uso do gerenciamento do atrito também é indicado para casos pontuais, por exemplo, problema de ruído em determinada seção da via, aparecimento de corrugação, altas forças laterais em determinada seção da via que gere alta degradação da via.

3.1. Redução do desgaste de trilho e de roda – Atrito como proteção contra o desgaste

O desgaste é uma consequência natural do contato roda-trilho. O perfil que o trilho desenvolve naturalmente é função do escoamento plástico, fadigas de contato e desgaste. (Figura 69)

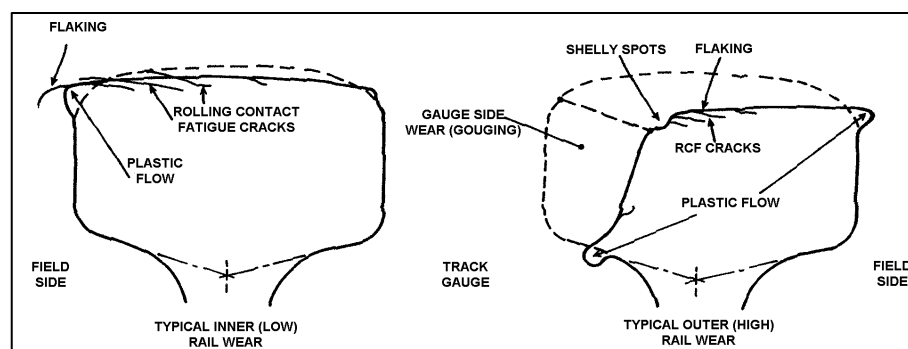


Figura 69: Possíveis desgastes dos trilhos. (MAGEL E. , 2011)

Em uma escala microscópica, todas as superfícies incluindo trilhos e rodas são rugosas. As superfícies de contato possuem saliências microscópicas chamadas asperidades. As asperidades nas respectivas superfícies prendem-se, rompem-se e rasgam-se uma nas outras (Figura 70).

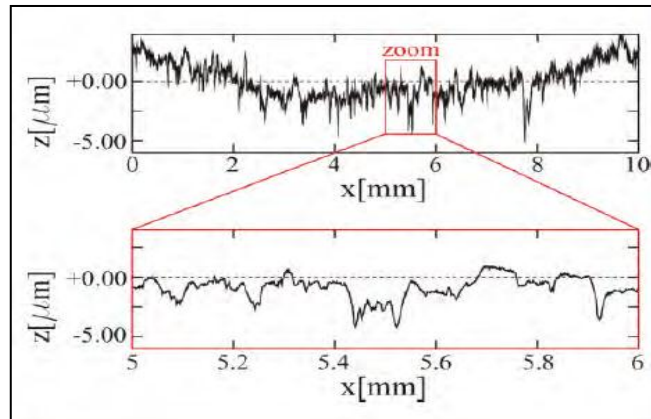


Figura 70: Asperidades do contato.

O atrito é dependente da resistência desta árdua interface entre a roda e o trilho em compressão e cisalhamento. Os lubrificantes criam um filme limite entre as superfícies de contato que evita as superfícies de “trabalharem” entre si, onde o flange da roda esmerilha a face de bitola. O objetivo é separar as superfícies de contato para que não sofram de abrasão e arrancamento de material uma da outra. Esta situação requer uma proteção com alta resistência à compressão e baixa resistência ao cisalhamento e o não rompimento em altas temperaturas. Isso explica a prevalência de graxas a base de petróleo na lubrificação convencional da face/canto de bitola.

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

Princípio de funcionamento do modificador de atrito:

Um dos componentes presentes no terceiro corpo são partículas de óxido de ferro com alta dureza provenientes do desgaste, a partir do momento que o *creepage* vai se acumulando até o ponto de contato estiver saturado, a tendência das partículas é se chocarem entre si, Figura 71. O choque das partículas de alta dureza gera desgaste, quanto maior a quantidade de óxido de ferro maior será a geração de desgaste.

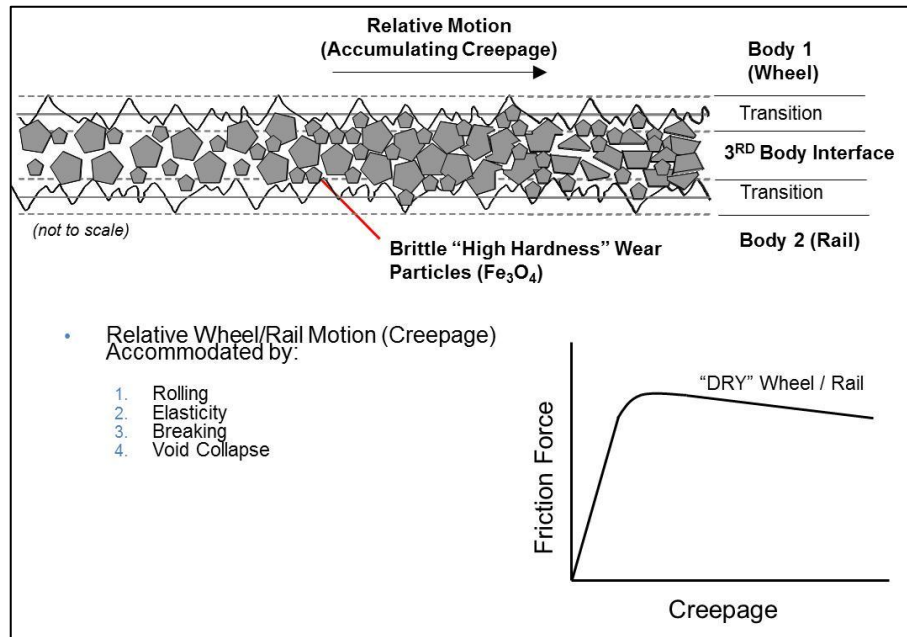


Figura 71: Partículas de óxido de ferro no terceiro corpo. (STOCK & OLDKNOW, 2010)

Com a introdução do modificador de atrito *Keltrack* no terceiro corpo, as partículas sólidas flexíveis e macias contidas na fórmula do produto penetram entre as partículas de óxido de ferro. À medida que o *creepage* vai acumulando, as partículas de óxido tendem a se chocar entre si, porém as partículas do modificador de atrito evitam o choque, funcionando como um mecanismo de deformação evitando a quebra das partículas de óxido de ferro que geram o desgaste. Além disso, proporciona ao ponto de contato a característica de fricção positiva, Figura 72.

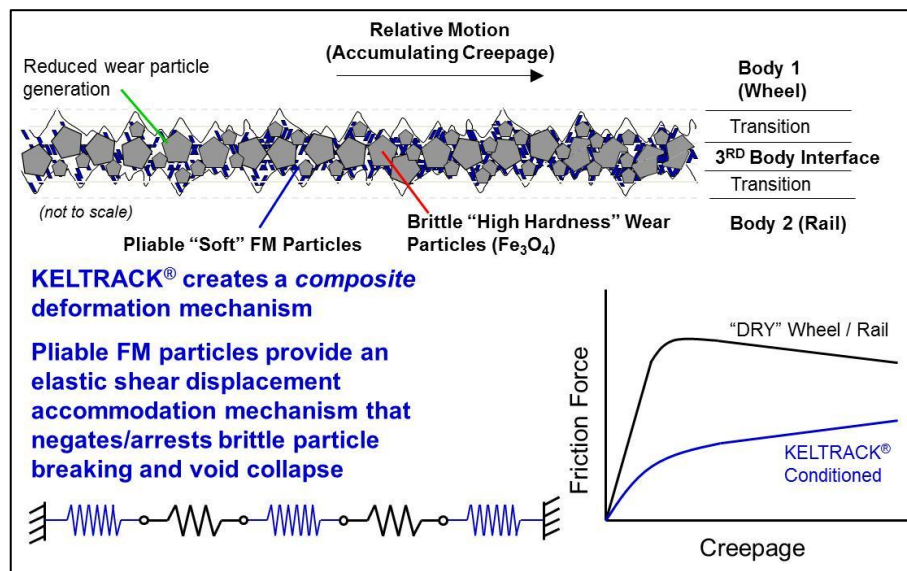


Figura 72: Partículas de óxido de ferro e modificador de atrito no terceiro corpo. (STOCK & OLDKNOW, 2010)

3.2. Redução do desenvolvimento de RCF

A iniciação e crescimento das trincas de RCF é um fator determinante na vida útil dos trilhos. RCF é formada quando a pressão do contato e as condições de deslizamentos (*creepages*) resultam no fenômeno *ratcheting* do material. *Ratcheting* (Figura 73) é uma acumulação de deformação plástica que eventualmente exauri a ductilidade do aço do trilho e resultam na formação de trincas. Essas trincas crescem no corpo do trilho, dirigidas pelas forças de interação roda-trilho e de tração na superfície do trilho; resultando em defeitos superficiais ou transversais. Defeitos transversais eventualmente podem levar a quebra do trilho e necessitam a remoção das trincas por esmerilhamento antes da fase de crescimento acelerado das trincas. (OLDKNOW K. , Controlling friction delivers longer rail life, 2012)

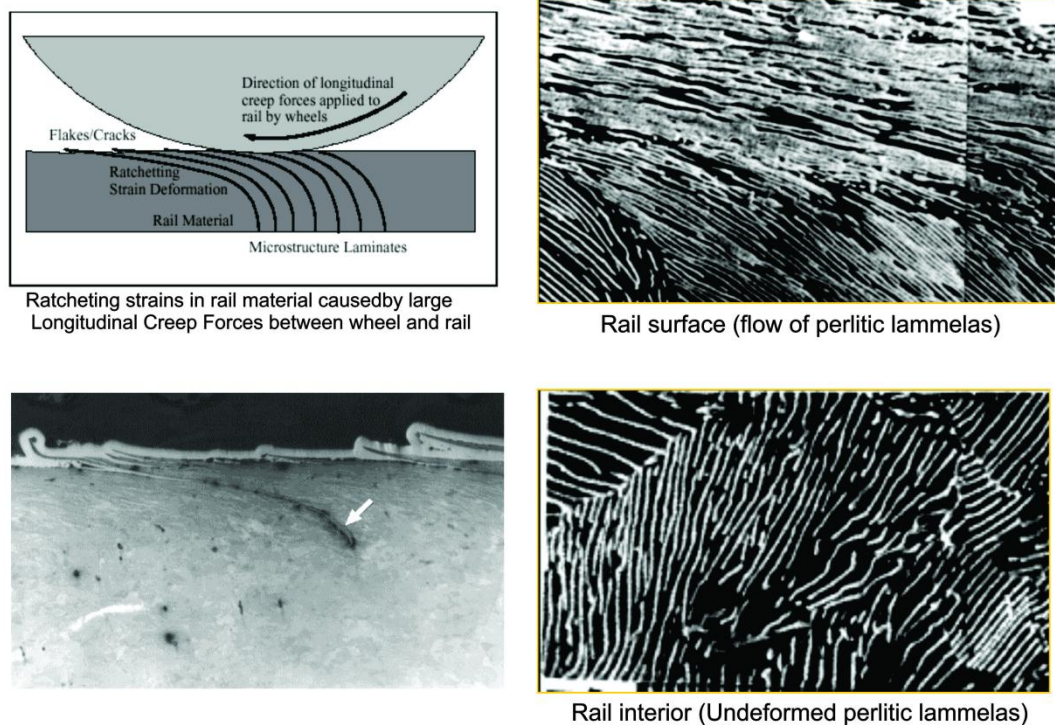


Figura 73: Efeito da tensão de cisalhamento = Ratcheting. (Fassarella & Rajkumar, 1999)

Trilhos *Premium* devem ser usados em conjunto com o gerenciamento do atrito para minimizar tanto o desgaste quanto o desenvolvimento de RCF. Um aumento na dureza do trilho e na resistência ao escoamento de cisalhamento, características que acompanham os trilhos *Premium*, introduz a resistência ao desgaste e a redução a suscetibilidade de altas tensões do contato. O gerenciamento do atrito simultaneamente reduz a tração na superfície e a dissipação de energia, os quais complementam o comportamento do aço do trilho em resistir ao desgaste a RCF. (OLDKNOW K. , Controlling friction delivers longer rail life, 2012)

Segundo (EADIE & KALOUSEK, Spray it on, let 'em roll, 2001) relata que tanto lubrificantes como modificadores de atrito podem mitigar os danos às rodas e aos trilhos causados pelo RCF. Ambos têm comportamento semelhante para inibir o início das fissuras relacionadas ao RCF, porém modificadores de atrito têm também a habilidade de minimizar o crescimento das fissuras já existentes. Uma vez iniciadas, as fissuras irão se propagar, a não ser que sejam removidas pelo

esmerilhamento ou pelo desgaste natural. Como os lubrificantes possuem líquidos, eles tendem a pressurizar as fissuras, fazendo com elas se propaguem; os modificadores de atrito possuem sólidos em sua formulação e não causam este efeito. Assim, modificadores de atrito ajudam a minimizar o crescimento das fissuras e, em consequência, a minimizar os danos causados pelo contato roda x trilho.

É conhecido que uma taxa de tração em torno 0,4 promove danos à superfície do trilho e da roda, e que o coeficiente de atrito, portanto deve ser menor que 0,4. (LEWIS & U., 2009)

Diagrama de Shakedown

Quando altas pressões de contato atuam na interface roda-trilho, a resistência de escoamento do material do trilho é excedida e resulta em escoamento plástico. Durante os primeiros ciclos de carregamento pelas rodas passantes, a camada superficial do material do trilho é plasticamente comprimida e uma tensão residual paralela à superfície atua. Durante as subseqüentes passagens das rodas, o material do trilho é sujeito a ações combinadas de tensões residuais e tensões de contato, com isso, a ocorrência de escoamento é menos provável. Este processo é conhecido pelos metalurgistas como endurecimento a frio do material e quando esse processo é confinado no contato de rolamento, é referido como *Shakedown*. O máximo carregamento o qual um material pode ser endurecido a frio é chamado de Limite de *Shakedown* ou limite de plasticidade. Em outras palavras, se a magnitude da tensão de contato cai entre o limite elástico e o plástico, o material do trilho endurece a frio e o sistema trabalha em um ciclo elástico de tensões. Sobrecarregando o material do trilho acima do limite plástico, resulta em uma contínua e cumulativa deformação plástica do material do trilho. (KING & KALOUSEK, 1976)

O limite de plasticidade é proporcional à dureza do metal do trilho. Na presença de forças de tração na zona do contato, causadas pela tração, frenagem e forças laterais em curvas, o limite de plasticidade diminui com o aumento do coeficiente de atrito como mostrado na Figura 74. Nesta figura, o efetivo coeficiente de atrito é apresentado como a relação entre a força de tração e o carregamento normal (F_t/P). Na realidade, isto significa que o efeito benéfico do endurecimento a frio do material do trilho em curvas é perdido quando o coeficiente de atrito atinge o valor de 0,26. (KING & KALOUSEK, 1976)

A Tabela 7 indica o limite de plasticidade q_{pl} para vários tipos de trilhos em relação à tensão máxima de contato Hertziana. O aumento no limite de plasticidade e a redução do escoamento plástico ficam evidentes com o aumento da dureza do trilho.

	Limite de plasticidade q_{pl} (psi) para diferentes dureza de trilhos		
	250-270 BHN	310-330 BHN	360-380 BHN
Linha tangente (caso de rolamento puro)	250000	305000	365000
Curvas (rolamento com força lateral de tração)	185000	225000	275000

Tabela 7: Limites de plasticidade para variação da dureza do trilho. (KING & KALOUSEK, 1976)

A passagem das rodas resulta em repetitivos carregamentos no material da superfície do trilho. A Figura 75 ilustra o comportamento do material sujeito ao ensaio repetitivo de carregamento (*push pull type*). No regime (a), os carregamentos são extremamente baixos e a deformação ocorre de modo puro (Lei de *Hooke*), o material irá falhar através de um altíssimo ciclo de repetições. No regime (b), o carregamento está acima do limite elástico e causa deformação plástica, resultando no desenvolvimento de tensão residual e o perfil do trilho se torna conformal. O material deforma no modo puramente elástico, mesmo que tenha deformado plasticamente nos carregamentos iniciais. Este processo é denominado *Shakedown* e o carregamento limite abaixo do qual é possível, é denominado como limite de *Shakedown* (*Shakedown Limit*). O material tem longa vida e irá falhar por um altíssimo ciclo de repetições. Se o carregamento for acima do limite de *Shakedown*, o escoamento ocorre. No regime (c), o material entra num ciclo de escoamento fechado e irá falhar quando submetido a um pequeno número de repetições. No regime (d) o ciclo de escoamento é aberto e cada ciclo de carregamento produz um aumento na deformação plástica, este regime é chamado de *ratcheting* ou colapso gradual. O limite entre os regimes (c) e (d) é conhecido como limite plástico de *Shakedown*. (SHEN, KAPOOR, LU, & XU, 2009)

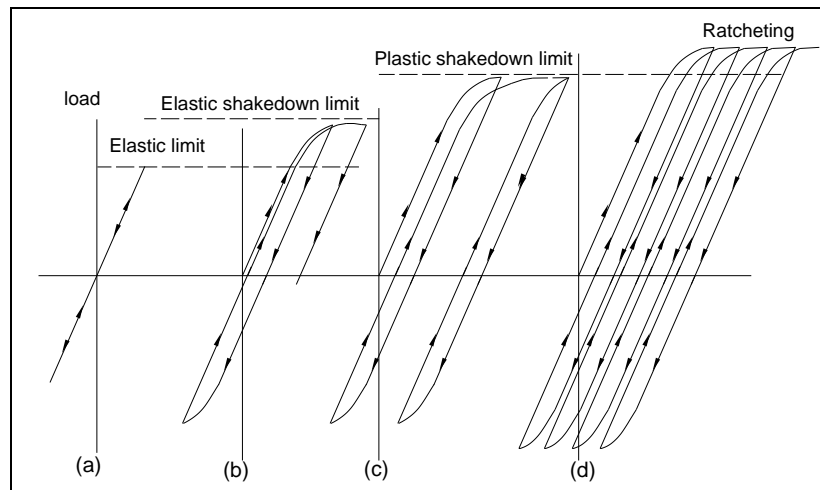


Figura 75: Diferentes respostas para o ciclo de carregamento. (SHEN, KAPOOR, LU, & XU, 2009)

Para condições de contato linear sem atrito, o limite do *Shakedown* é $4K$, onde K é a tensão de escoamento ao cisalhamento do material do trilho. Se a máxima pressão de contato é menor que $4K$, o material irá se comportar puramente elasticamente. Para uma condição de contato circular sem atrito, o limite de *Shakedown* apropriado é $4,65K$. Para rolamento e deslizamento com atrito, o limite de *Shakedown* é baixo, caindo na razão de $1/\mu$ para cada coeficiente de atrito maior que $0,3$. (SHEN, KAPOOR, LU, & XU, 2009)

É conhecido que materiais exibem uma alta tensão de escoamento se deformados em altas velocidades. Quando um trem de alta velocidade passa, a superfície do material é deformada em uma tensão muito alta, e a efetiva tensão de escoamento (também chamada de “tensão de escoamento dinâmica”) do material do trilho governa o limite de *Shakedown*. (SHEN, KAPOOR, LU, & XU, 2009)

A Figura 76 ilustra alguns fatores que interferem a teoria do *Shakedown*, no eixo vertical, fatores como deficiência de superelevação, altas cargas por eixo, pequeno diâmetro de rodas, perfis

de roda e trilho incompatíveis, bitola apertada da via e inclinação incorreta do trilho causam o aumento das tensões de contato, fazendo que o limite do Shakedown seja superado, consequentemente gera regime de escoamento na subsuperfície do trilho. No eixo horizontal, fatores como a falta de lubrificação, uso de enrijecedores de tração, creepages, operação de parada e partida de trens e rigidez da suspensão do truque, causam aumento do coeficiente de tração (Q/P), fazendo que o limite do Shakedown seja superado e consequentemente gera regime de escoamento na superfície do trilho.

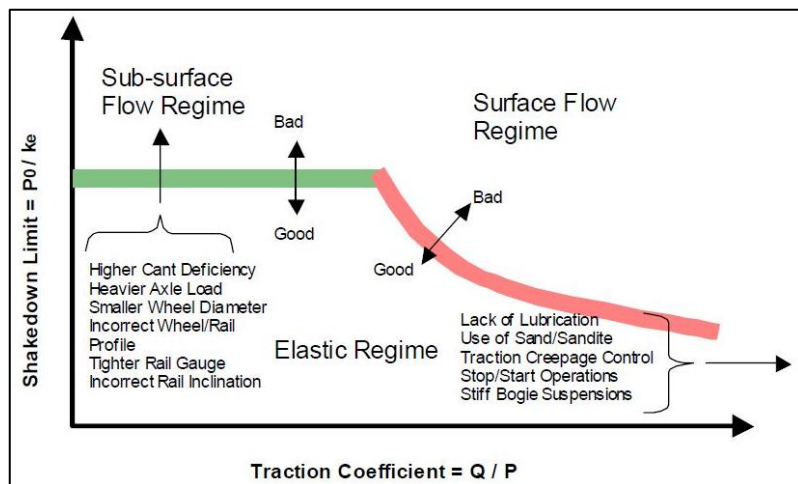


Figura 76: Fatores que influenciam a teoria do Shakedown.

Considerando um trilho NSC HE-400X com dureza de 420 brinell, temos o fator de carga $P_0/K=2,86$, considerando um coeficiente de atrito 0,4, e imputando os valores no diagrama de Shakedown (Figura 77), observamos que o ponto de interseção da reta do fator de carga e o coeficiente de atrito já está acima do limite de Shakedown, onde o material está em constante deformação plástica. Reduzindo o coeficiente de atrito para 0,3, o ponto de interseção está dentro do limite elástico, o que significa quanto maior o coeficiente de atrito, mais rapidamente o trilho entrará em colapso por RCF. Um coeficiente de atrito no topo do trilho de um trilho sem o gerenciamento do atrito poderá alcançar valores maiores que 0,5 facilmente.

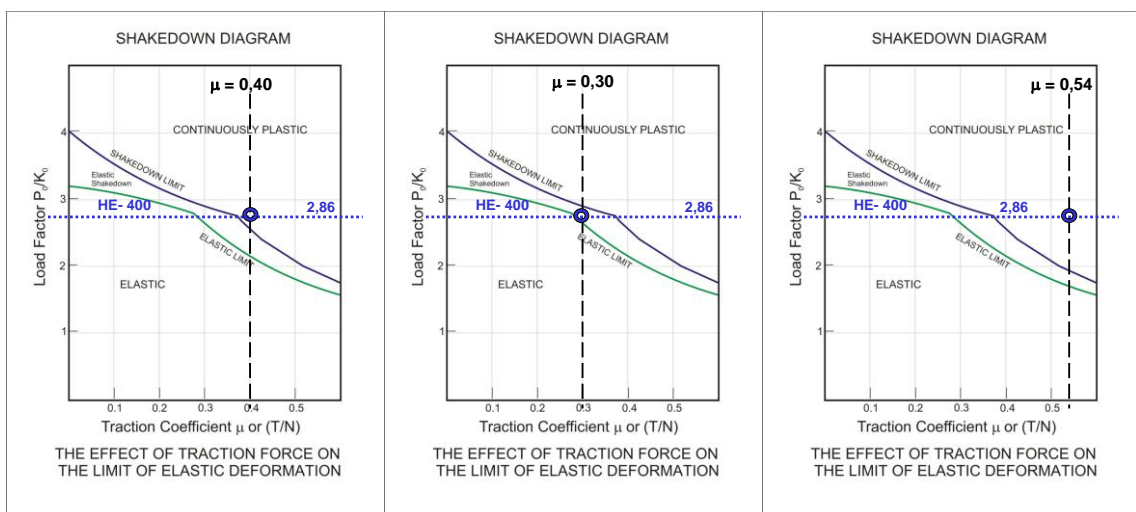


Figura 77: Variação do COF no diagrama de Shakedown.

Quanto maior a dureza do trilho e menor o coeficiente de atrito, maior a resistência do trilho quanto a defeitos de RCF.

3.3. Aumento da Eficiência Energética

Reduzir o consumo energético (locomotivas a combustíveis e elétricas) e a emissão de gases do efeito estufa vem ganhando muita importância na indústria norte-americana ferroviária. O controle do atrito no topo do trilho tem emergido como uma importante e significativa ferramenta para esse propósito, embora um modelo de prever a economia de combustível em diferentes condições de operação ainda está em desenvolvimento. Trabalhos anteriores de modelagem e simulação da economia de combustível nas locomotivas indicam um exponencial aumento na economia à medida que aumenta a densidade de curvas, o que tem sido atribuído a redução da resistência de curva devido a implementação do controle do atrito.

Os resultados indicam que em trechos em tangentes contendo um baixo percentual de curvas, o potencial de economia de energia é um pouco mais baixo. Entretanto, recentes modelagem e estudos usando aplicação de modificador de atrito em locomotivas indicam que a economia de combustível em territórios com curvas moderadas pode ser maior que o esperado. Anteriormente, era assumido que a economia de energia devido ao uso do controle do atrito no topo do trilho em trechos em tangente era devido a uma melhora na estabilidade e redução da intensidade do *hunting* em determinadas velocidades. Enquanto isso é indiscutivelmente um fator para reduzir o consumo de energia, porém parece insuficiente para explicar toda a magnitude das economias observadas.

Uma possível explicação é em razão do truque dos vagões não estar em condições ideais o que causaria o vagão de aumentar a resistência de curvatura e rolamento. Dois casos comuns de imperfeitos truques são os rodeiros desalinhados e o não ideal atrito no prato de pião. Ambos cenários permitem uma enorme economia de energia através do uso do controle do atrito, minimizando o efeito negativo causado por inevitáveis e típicas imperfeições dos truques.

3.4. Risco de descarrilhamento – Wheel Climb and Rail Rollover

A lubrificação da face de bitola evita o descarrilhamento por subida de roda, o qual a roda escala a face de bitola do trilho e sobe ao topo do trilho. Com o COF da face de bitola baixo, é difícil a subida da roda.

Lubrificando a face de bitola, um aumento do ângulo de ataque é observado, pois o momento de giro do truque é facilitado. Esta situação gera uma força de deslizamento lateral (*lateral creep*) que tende a aumentar a força lateral. Por outro lado, reduzindo o COF na face de bitola, o índice crítico de L/V é aumentado, ou seja, a chance de descarrilhamento diminui. Quanto maior o L/V crítico melhor. Pela relação de Nadal, considerando o ângulo da face desgastada de 30° o benefício da lubrificação é facilmente observado na Figura 78. Um $\mu=0,25$ o L/V crítico é 1 e para um $\mu=0,55$ o L/V crítico é 0,6.

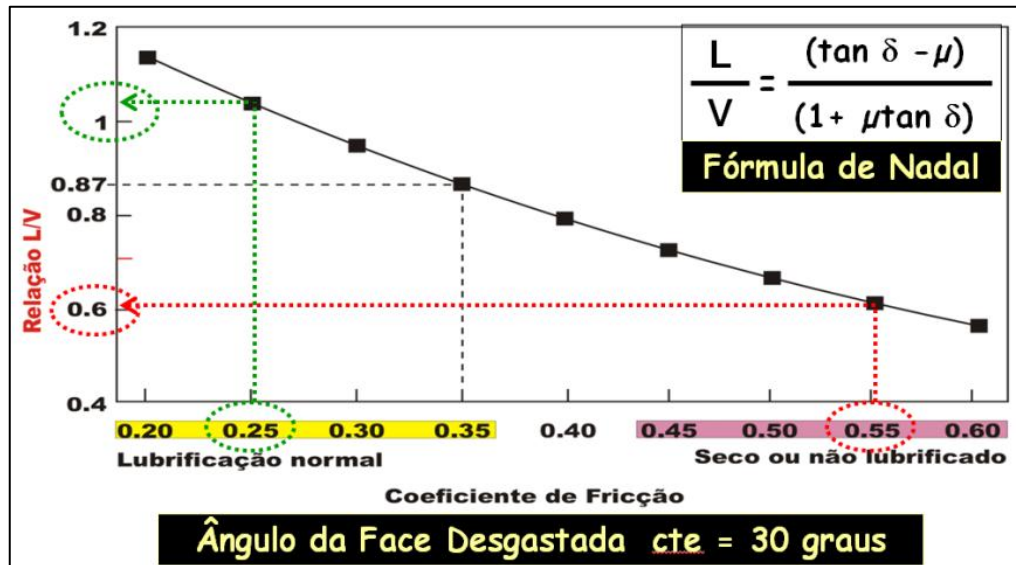


Figura 78: Relação de Nadal e COF.

A diminuição do risco de quadramento do trilho é alcançada com a redução da força lateral. A resistência ao quadramento do trilho é muito menor no trilho interno, e qualquer aumento da força lateral quando a força vertical permanecer constante é risco de quadramento do trilho.

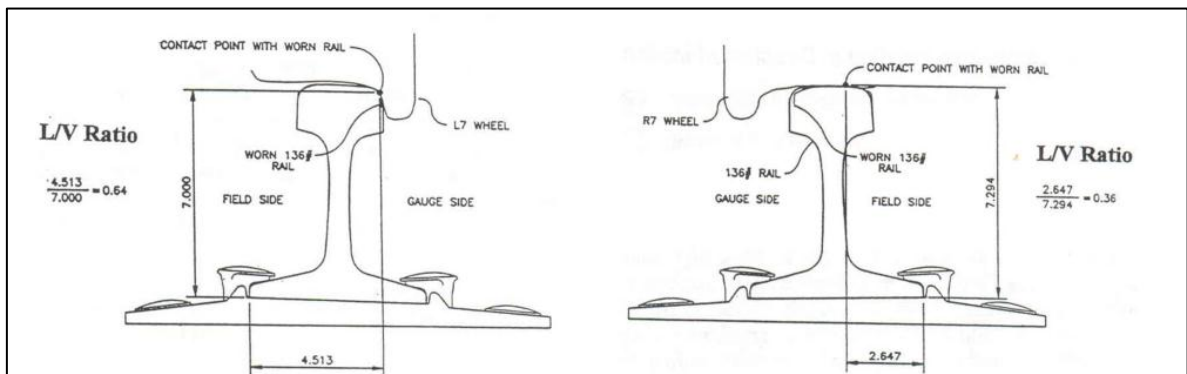


Figura 79: L/V no trilho interno e externo.

A redução da força lateral é obtida através do controle do atrito no topo do trilho que é explicada no item 3.5.

3.5. Redução da Força Lateral

Na Figura 80 são apresentadas as forças existentes quando um rodeiro inscreve uma curva.

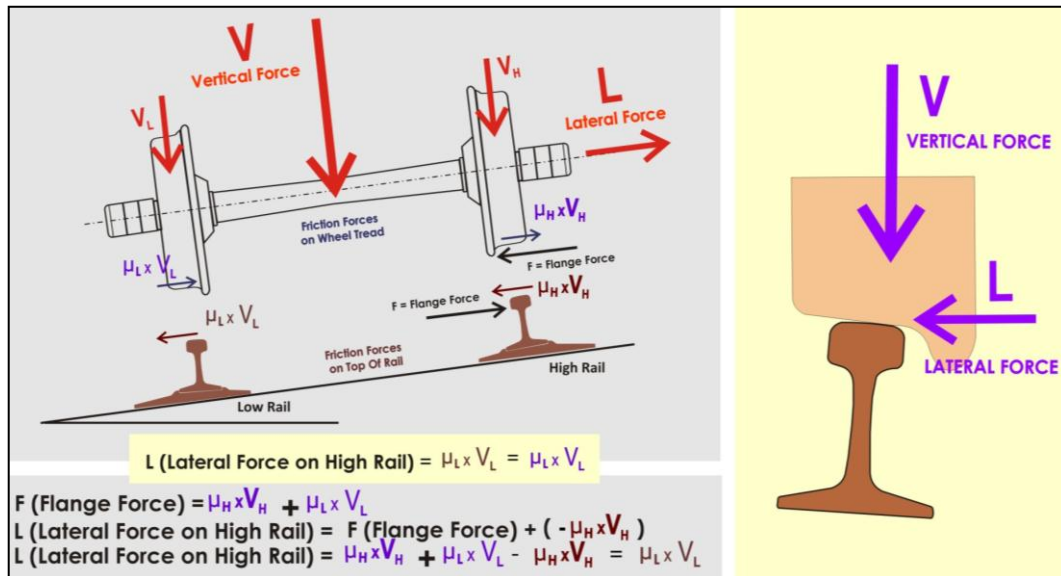


Figura 80: Forças simplificadas existentes quando um rodeiro-guia inscreve uma curva.

A magnitude da força lateral é o coeficiente do atrito do trilho interno da curva multiplicado pela força vertical sobre o trilho interno, com isso, reduzindo o coeficiente de atrito no trilho interno invariavelmente reduziremos a força lateral.

A Figura 81 apresenta as forças geradas quando um truque inscreve uma curva apertada e destaca as forças reduzidas (em verde) pela aplicação do TOR.

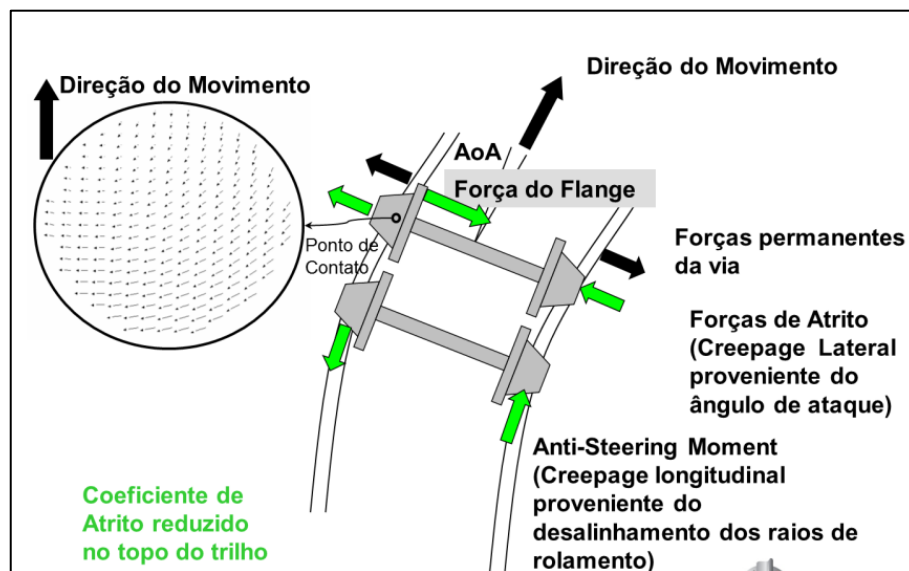


Figura 81: Forças geradas quando o truque inscreve uma curva apertada.

Reduzindo a magnitude da força lateral, conseqüentemente a solicitação sobre a superestrutura da via permanente é reduzida, e os impactos são:

- Redução da necessidade de realização de consolidação de bitola;
- Redução de placas de apoio quebradas ou desgastadas;
- Redução da necessidade de correção geométrica da via;
- Aumento da vida útil de grampos;

- Aumento da vida útil da dormentação devido à redução do fenômeno *tie plate cutting* (placa de apoio cortando a superfície do dormente).



Figura 82: Placa de apoio cortando o dormente e placas de apoio fraturadas devido à alta força lateral.

3.6. Redução do Ruído (EADIE., KALOUSEK, & CHIDDICKI, 2000)

Uma série de mecanismos existe na geração de ruídos no sistema roda-trilho. Estes mecanismos incluem rodas calejadas, juntas de trilho, rugosidade excessiva das superfícies e outros. Corrugações de ondas curtas (*short pitch*) também produzem um tipo de ruído conhecido como rugido de trilho (*roaring rail*).

O ruído mais crítico que afeta os seres humanos são os de alta frequência, ruído agudo (*squeal noise*). Um número de mecanismos responsáveis pela geração do ruído agudo tem sido proposto. Em curvatura em curvas apertadas, o *creep* lateral da roda no trilho pode iniciar as oscilações *stick-slip* quando a interface roda-trilho tem características de fricção negativa. A energia dissipada no processo *stick-slip* excita o ruído agudo. A vibração causada pelo mecanismo de *stick-slip* causa uma oscilação do tipo diafragma na alma da roda quando esta inscreve nas curvas.

Embora a lubrificação da face de bitola com graxa em algumas vezes é usada para controlar o ruído, esta técnica é relativamente ineficaz porque não atinge o topo do trilho, região de origem do ruído agudo. A aplicação de graxa no topo do trilho interno também é comum, mas os resultados são frequentemente inconsistentes.

Introduzindo o modificador de atrito HPF na interface roda-trilho, a característica de fricção negativa que gera o processo *stick-slip* e ruído agudo é superada.

Com a lubrificação da face de bitola, uma melhora no ruído será observada. O ruído causado pelo contato do flange da roda com a face/canto de bitola (*flanging noise*) será atenuado, porém como dito anteriormente, o ruído agudo (*squeal noise*) é o mais danoso aos seres humanos.

3.7. Redução do aparecimento de corrugação

O aparecimento de corrugação está relacionado com o fenômeno *stick-slip*. Estudos do fenômeno *stick-slip* indicam três métodos de reduzir ou eliminar este fenômeno:

- Aumentar a rigidez do sistema mecânico ou equipamento onde o *stick-slip* ocorre;
- Reduzir o COF entre os corpos que se movem a níveis baixos;
- Mudar as características do atrito negativo para positivo entre as superfícies que se movem.

Fornecendo suficiente fricção positiva na interface roda-trilho, dois dos três métodos para reduzir as oscilações *stick-slip* que induzem as corrugações são alcançados:

- Modificadores de atrito reduzem o COF para 0,35 e controla o COF a níveis que não interferem na tração/frenagem
- Modificadores de atrito mudam o comportamento friccional da interface, de negativo para positivo.

3.8. Redução de Hunting

Vagões de carga alcançam a instabilidade dinâmica no movimento lateral em uma de duas maneiras: erros laterais periódicos podem excitar o corpo do vagão que entra em ressonância e gera um modo de guinada no vagão ou os truques podem tornar-se instáveis em certas velocidades.

A ressonância de guinada do vagão ocorre quando o padrão de juntas e soldas , quando trafega a uma velocidade particular, interage com a ressonância de guinada do próprio vagão. A ressonância de guinada ocorre tipicamente em velocidades de 80-100 km/h, em tangentes e mais frequente em vagões com base rígida pequena, tal como vagões que carregam minério de ferro. Este fenômeno é reconhecido pelo padrão regular do desgaste sinusoidal lateral dos trilhos alternando trilho direito e esquerdo.

Hunting refere-se a um movimento de oscilação dos truques (Figura 83 e Figura 84). Um severo movimento lateral ocorre o qual é caracterizado pelos impactos do flange da roda e perda da travessa lateral e rodeiros. Em severos *huntings*, o impacto do flange causa alívio de roda.

O *hunting* é ocasionado por um deslocamento lateral do rodeiro em relação ao eixo da via, esse deslocamento lateral pode ser ocasionado por: incompatíveis ΔR (diferença de raios das rodas dos rodeiros), forças de atrito e o momento de inscrição do rodeiro.

O rodeiro passa pela posição central com uma velocidade lateral (Figura 85). Em velocidades baixas, as oscilações de *hunting* diminuem; acima da velocidade crítica as oscilações persistem.

Reduzindo o atrito no topo do trilho: reduzimos às forças, o momento de inscrição de curva, a velocidade lateral. Com isso a velocidade crítica é aumentada e a intensidade do *hunting* reduzida.

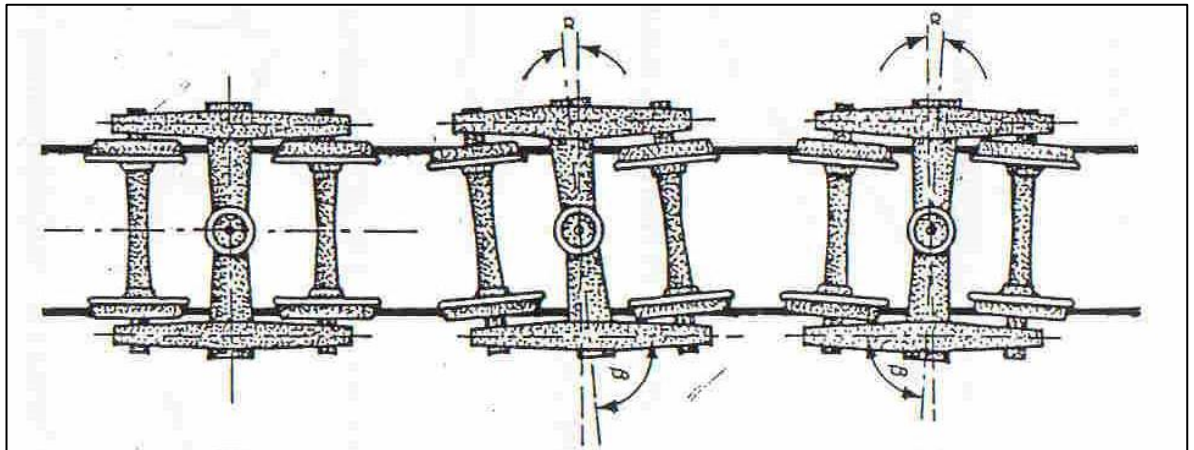


Figura 83: Hunting: os rodeiros oscilam para esquerda, e logo em seguida oscilam para a direita.

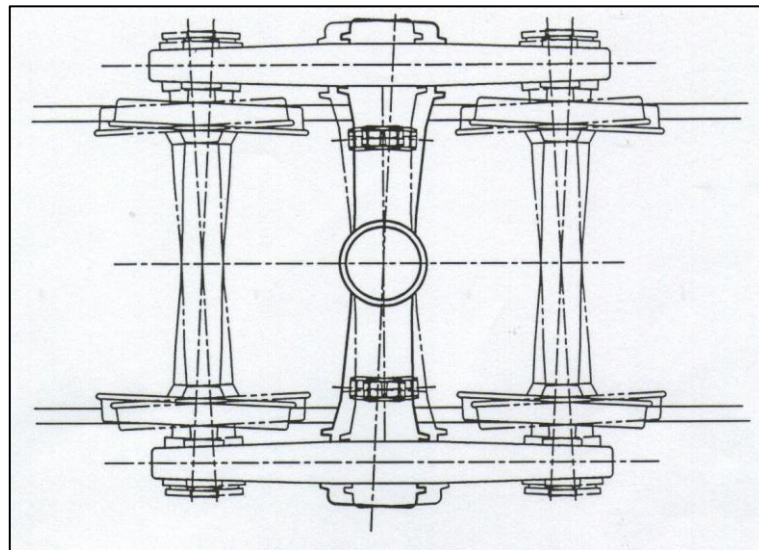


Figura 84: Oscilação de hunting no truque.

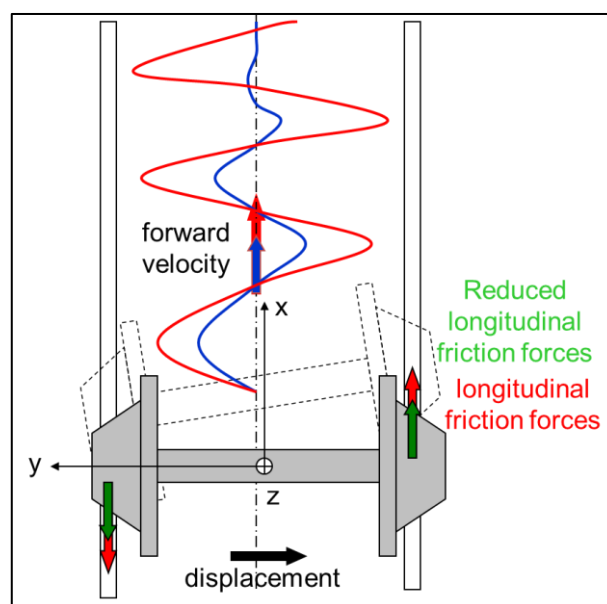


Figura 85: Hunting no rodeiro.

3.9. Lubrificantes:

O principal propósito da lubrificação é reduzir o desgaste e o aquecimento no contato entre duas superfícies em movimento. Como o desgaste e o aquecimento não podem ser completamente eliminados, eles podem ser reduzidos para níveis aceitáveis ou insignificantes. Como o desgaste e o calor são associados ao atrito, o efeito de ambos podem ser reduzidos através da redução do coeficiente de atrito entre as superfícies de contato.

A redução do desgaste e aquecimento é alcançada através da inserção de um material de baixa viscosidade (baixa resistência ao cisalhamento) na superfície de desgaste que possui um coeficiente de atrito relativamente alto. Na realidade, a superfície de desgaste é substituída por um material com o coeficiente de atrito desejado. Qualquer material usado para reduzir o atrito é um lubrificante.

Para interface roda-trilho, os lubrificantes podem ser sólidos, líquidos (óleos) e graxas.

3.9.1. Graxa

Graxa é uma mistura semifluida a sólida de um lubrificante fluido, um espessante e aditivos. O fluido lubrificante que desempenha a lubrificação atual podem ser óleo de petróleo (mineral), óleo sintético ou óleo vegetal. O espessante fornece a graxa sua característica de consistência e às vezes é pensado como uma rede de fibras tridimensional ou esponja que retém o óleo no lugar. Espessantes comuns são os sabões e não sabões orgânicos e inorgânicos. A maioria das graxas do mercado é composta por óleo mineral misturado com um sabão espessante. Aditivos elevam o desempenho e proteção da graxa e das superfícies lubrificadas. (U.S. Army Corps of Engineers, 1999)

O funcionamento da graxa pode ser descrito em função da temperatura, quando o filme lubrificante entre as superfícies de desgaste torna-se fino, o aquecimento resultante amolece a graxa adjacente que expande e libera o óleo para restaurar a espessura do filme. (U.S. Army Corps of Engineers, 1999)

As características da graxa que precisam ser avaliadas para o uso na lubrificação de trilhos são descritas a seguir.

Consistência, penetração e grau NLGI:

A característica mais importante da graxa é sua rigidez ou consistência. Uma graxa muito rígida não se mantém em áreas que precisam de lubrificação, enquanto uma graxa muito fluída talvez escorra. A consistência da graxa depende do tipo e a quantidade de espessante usado e a viscosidade do óleo base. A consistência de uma graxa é a resistência à deformação quando uma força é aplicada. A medida da consistência é a penetração. A medida da penetração baseia-se no grau de penetração de um cone padronizado na graxa a uma temperatura de 25°C durante cinco segundos. A profundidade de penetração é medida numa escala de 10^{-1} mm e, quanto mais alto for o valor, mais macia será a graxa. O NLGI estabeleceu o grau de consistência NLGI organizados na Tabela 8:

Classificação das graxas pelo número de consistência da NLGI		
Número NLGI	Penetração ASTM (10^{-1} mm)	Aparência à temperatura ambiente
000	445 - 475	muito fluida
00	400 - 430	fluida
0	355 - 385	semi-fluida
1	310 - 340	muito macia
2	265 - 295	macia
3	220 - 250	Medianamente dura
4	175 - 205	dura
5	130 - 160	muito dura
6	85 - 115	extremamente dura

Tabela 8: Grau NLGI de graxas.

Normalmente, em climas quentes é usada a graxa com grau NLGI 2 e em climas frios graxa com NLGI 1. As ferrovias americanas que possuem verão quente e inverno rigoroso utilizam graxas NLGI 2 e 1 respectivamente.

Ponto de gota:

É a resistência ao calor. A medida que a temperatura da graxa aumenta, a penetração aumenta até a graxa liquefazer e a consistência desejada é perdida. Em outras palavras, ponto de gota é a temperatura em que a graxa começa a gotejar. Ponto de gota significa a temperatura máxima que a graxa retém sua estrutura e não a temperatura máxima de trabalho. Geralmente a temperatura de trabalho é 20-30% menor que o ponto de gota.

Bombeabilidade:

É a habilidade de a graxa ser bombeada ou empurrada pelo sistema. Em termos práticos, é a facilidade com qual a graxa pressurizada flui através tubulações, conexões, bicos e portas dos sistemas de aplicação. Graxas consistentes podem ter seu bombeamento dificultado pelo fenômeno de cavitação, que é a formação de colunas de ar na graxa que impedem a sucção.

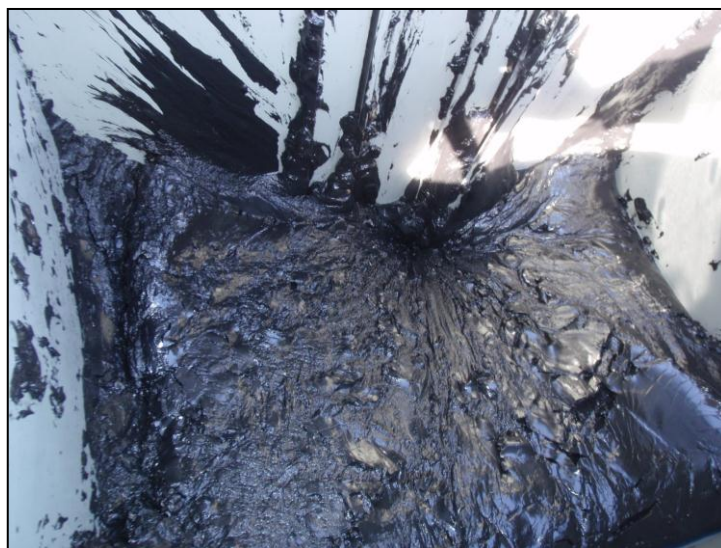


Figura 86: escoamento não uniforme da graxa no reservatório do lubrificante.

Lubricidade:

É a capacidade do lubrificante de reduzir o atrito. É a capacidade do lubrificante de gerar baixos coeficientes de atrito, $\mu < 0,25$.

Retentividade:

É a medida de tempo que o lubrificante consegue manter sua lubricidade. Em termos de lubrificação de trilhos, é a quantidade de tráfego bruto, geralmente expressa em MTBT, em que a graxa mantém sua lubricidade.

Resistência à água (wash out):

É a capacidade de resistir aos efeitos da água sem interferências na lubrificidade. Uma espuma de sabão ou água pode suspender o óleo da graxa, formando uma emulsão que pode ser lavada ou no mínimo reduzir a lubricidade devido a diluição e mudança da consistência e textura da graxa.

Separação do óleo:

As graxas lubrificantes liberam óleo quando armazenadas por longos períodos. (U.S. Army Corps of Engineers, 1999). O grau de separação do óleo (Figura 87) depende do espessante, do óleo base e do método de fabricação.



Figura 87: Separação de óleo da graxa no reservatório.

Aditivos de Extrema Pressão:

Agentes de extrema pressão reagem com o metal das superfícies para formar um composto que possui uma baixa resistência ao cisalhamento se comparada com a resistência do metal. A reação é iniciada com o aumento da temperatura causada pela pressão entre as asperezas das superfícies de desgaste. A reação cria um revestimento de proteção nos pontos específicos onde a proteção é

requerida. Este revestimento reduz o atrito, o desgaste entre as superfícies. Aditivos de extrema pressão são usados em carregamentos extremos.

Existem dois ensaios principais para avaliar a capacidade de um óleo lubrificante de suportar cargas elevadas em serviço. A capacidade EP de um óleo depende quase que integralmente dos aditivos de Extrema Pressão adicionados ao produto.

Four Ball

O método Four Ball ASTM D-2783 é um ensaio que avalia as propriedades de extrema pressão do lubrificante, utilizando uma esfera de aço que gira na parte superior a 1760 RPM sobre 3 outras esferas que estão imóveis em uma cuba de teste recoberta com o óleo. Os testes são feitos aumentando a carga até ocorrer a soldagem.

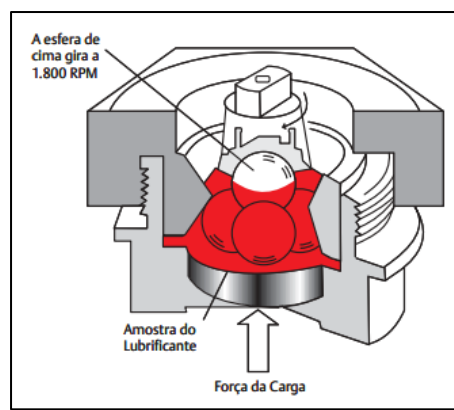


Figura 88: Ensaio Four Ball.

O método Four Ball ASTM D-4172 é um ensaio que avalia as propriedades antidesgastes do lubrificante, semelhante ao ASTM D-2783, porém, neste caso, após o ensaio, mede-se o diâmetro das escariações sofridas pelas esferas, em mm.

Para graxas os ensaios são ligeiramente diferentes e são, portanto, definidos por outros métodos:

- O método Four Ball ASTM D-2596 avalia as propriedades de extrema pressão da graxa até ocorrer à soldagem.
- O método Four Ball ASTM D-2266 avalia as propriedades de antidesgaste da graxa, medindo o diâmetro das escariações.

Timken

Este teste para óleos lubrificantes é feito sob o método ASTM D-2782. É um ensaio que avalia as propriedades de extrema pressão do lubrificante.

Um anel de aço gira contra um bloco de aço. São colocados pesos (libras), fazendo com que o anel exerça pressão sobre o bloco que está imóvel. Ao final, avalia-se o bloco, ou seja, se a aditivação presente no óleo não se rompeu, danificando o bloco.

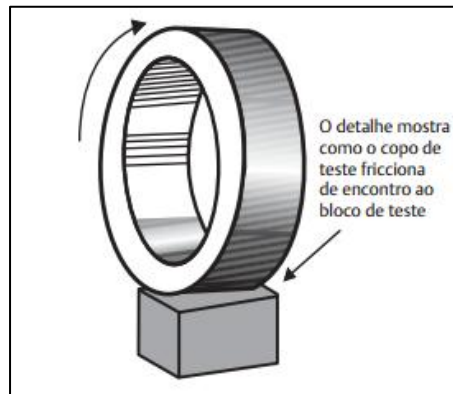


Figura 89: Ensaio Timken

Para graxas o ensaio é ligeiramente diferente e, portanto, definido por outro método:

- O método Timken ASTM D-2509 avalia as propriedades de extrema pressão da graxa, observando os danos causados no bloco de teste.

3.9.1.1. Tipos de graxa:

As graxas são diferenciadas quanto à natureza do espessante. Existe uma grande variedade de espessantes, dentre os quais, destacam-se sabões metálicos, argilas tratadas, polímeros de uréia e outros, sendo que cerca de 90% dos casos os espessantes empregados são sabões metálicos. Quanto à natureza do sabão metálico, as graxas classificam-se da seguinte forma, segundo (Chevron Brasil, 2005):

- Graxas à base de sabão de Cálcio – bastante aderentes, são indicadas para uso em peças que trabalham em contato com água. Não são indicadas para utilização em temperaturas superiores a 80°C.
- Graxas à base de sabão de Sódio – recomendadas para mancais planos e rolamentos que trabalham a altas velocidades e temperaturas elevadas (até 120°C) e, ocasionalmente, em engrenagens. É desaconselhável o seu uso em presença de umidade, pois o sabão é solúvel em água.
- Graxas à base de sabão de Alumínio – são indicadas para uso onde o principal requisito seja a característica de aderência da graxa, proporcionando boa proteção contra a ferrugem e resistência à lavagem por água. Não resiste a temperaturas elevadas.
- Graxas à base de sabão de Lítio – são bastante aderentes e relativamente insolúveis em água, substituindo, em aplicações convencionais, muito bem as graxas de Cálcio e Sódio, sendo, portanto, de aplicações múltiplas. Possuem grande estabilidade mecânica e alto ponto de gota, sendo de fácil aplicação por meio de pistolas e sistemas centralizados de lubrificação.
- Graxas à base de sabão Complexo – sabão complexo é aquele, em que a fibra do sabão é formada pela cocristalização de um sabão normal (Cálcio, Sódio, Alumínio ou Lítio) e um agente complexo, como: ácido acético, láctico, etc. Esse tipo de graxa apresenta como característica principal um elevado ponto de gota.

- Graxas espessadas sem sabão – são as que utilizam espessantes químicos inorgânicos ou orgânicos dispersos no óleo. Esses tipos de espessantes não são feitos com álcali metálico como os usados nas graxas espessadas com sabão. Exemplos: poliuréia e argila orgânica. São utilizadas visando o aproveitamento de suas características especiais como descrito adiante.

3.10. Modificadores de Atrito

3.10.1. Modificadores de atrito com característica de atrito positivo – HPF (High Positive Friction)

Nos últimos anos novos materiais tornaram-se disponíveis e possíveis para aplicação no topo dos trilhos sem interferências nas questões de segurança como, por exemplo, a frenagem. Esses materiais vêm sendo usados amplamente em ferrovias de cargas para redução da força lateral e desgaste do trilho. Os sistemas de metrô e trens metropolitanos também vêm usando esses materiais para redução do ruído (*squeal* e *flanging noise*). A redução do ruído é alcançada através da capacidade desses materiais de gerar a característica de fricção positiva na interface roda-trilho, a qual pode interromper o mecanismo *stick-slip* responsável pelo ruído. Esses materiais acima descritos são os modificadores de atrito. Recentes trabalhos também demonstraram a habilidade dos modificadores de atrito de minimizar o aparecimento de corrugação de onda curta.

Modificadores de atrito são materiais que controlam o coeficiente de atrito em níveis considerados ideais, que minimizam o desgaste sem afetar a frenagem ou tração. Estão disponíveis em forma de bastão sólido e líquido a base d'água.

As principais propriedades do modificador de atrito incluem a capacidade de estabelecer um filme fino e seco no trilho, o qual combina naturalmente com os materiais existentes no terceiro corpo (limalhas de aço e óxidos de ferro) provendo os seguintes atributos na interface roda-trilho:

- Intermediário nível de atrito (0,3-0,4) entre a roda e o trilho, o qual a tração e frenagem não é afetada;
- Relação positiva entre a tração e o *creepage*, característica da fricção positiva.

Modificadores de atrito líquidos contém uma suspensão de partículas sólidas e compostos polímeros. Quando aplicado no topo do trilho, a água evapora e uma fina película fina e seca permanece fornecendo um coeficiente de atrito entre 0.3-0.4. A viscosidade, a bombeabilidade, o tempo de secagem do modificador de atrito podem ser customizados de acordo com o método de aplicação. (EADIE., KALOUSEK, & CHIDDICKI, 2000)



Figura 90: Modificador de atrito Keltrack.

Modificadores de atrito em bastão contêm os componentes ativos para o controle do atrito em matriz polimérica. Assim que o material é transferido para banda de rodagem das rodas, o material da resina é queimado pela alta temperatura do contato roda-trilho propositalmente, uma micro camada de filme de modificador de atrito permanece, este material ocupa as asperidades microscópicas da superfície do metal fornecendo uma superfície mais suave. (EADIE., KALOUSEK, & CHIDDICKI, 2000)

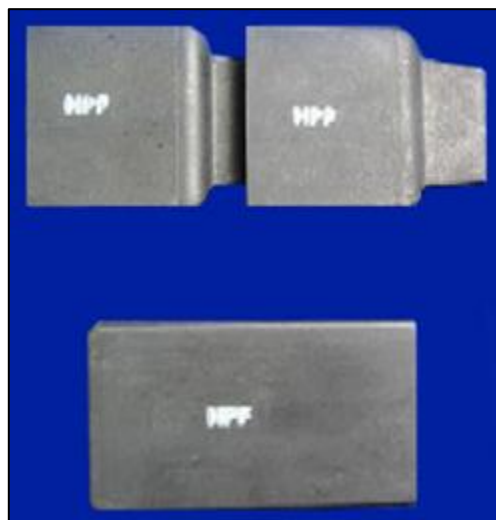


Figura 91: Modificador de Atrito em bastão sólido HPF.

O modificador de atrito mais conhecido e utilizado é o *KELTRACK® Trackside Freight*, fabricado pela Kelsan Technologies. Existem várias referências quanto a utilização deste produto em grandes ferrovias norte americanas, como *Union Pacific, Norfolk Southern, Canadian Pacific, Canadian National*, etc.

Fricção Positiva

A característica de fricção positiva é fornecida pelo modificador de atrito. Antes de definir a fricção positiva é necessário o entendimento de fricção negativa. A Figura 92 mostra a curva tração x *creepage*. O rolamento puro ocorre no ponto (0,0) do gráfico, o rolamento puro é teórico, na prática sempre ocorre o rolamento com micro-deslizamentos, quando o ponto de contato atinge o “joelho” (*knee*) da curva de tração x *creepage*, ponto saturado de deslizamento, é o máximo valor de tração que o contato roda-trilho consegue absorver, a partir deste ponto ocorrerá só o deslizamento.

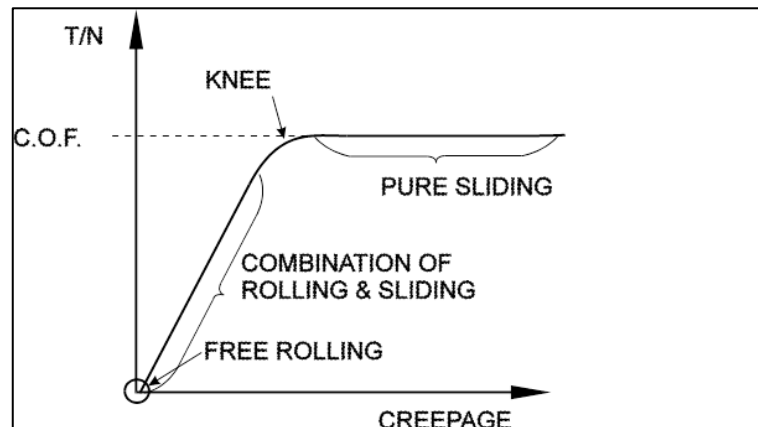


Figura 92: Situação teórica da curva tração x *creepage*.

Na prática (Figura 93) ocorre que quando o ponto de contato estiver saturado de deslizamento (o joelho da curva), o contato entra num circuito (*loop*), ou seja, rola-desliza. Esse fenômeno é conhecido como processo *stick-slip* (*roll-slip*). Após a condição saturada ser alcançada, qualquer aumento na força de tração acarretará no aumento do deslizamento, essa característica é chamada fricção negativa. Com o uso do modificador de atrito, o fenômeno *stick-slip* não ocorre, e a característica da fricção positiva é observada, ou seja, é a capacidade do atrito aumentar quando ocorre um deslizamento.

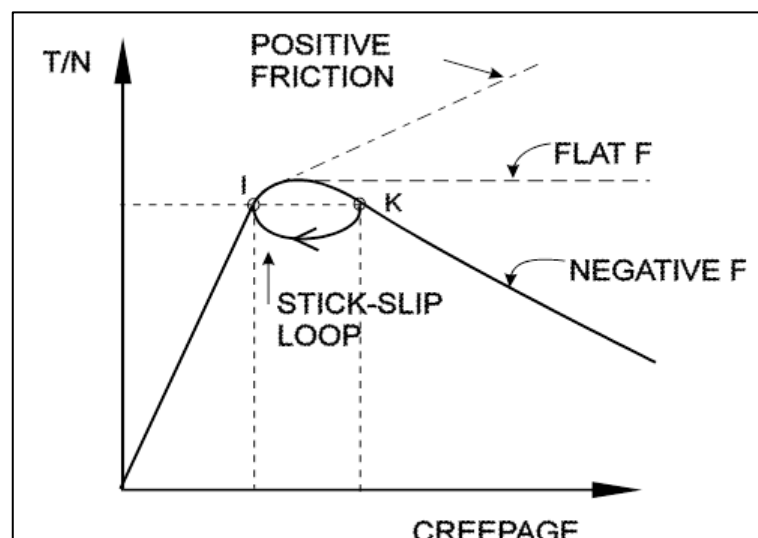


Figura 93: Situação Prática da curva tração x *creepage*.

A Figura 94 mostra a característica da fricção positiva alcançada com o uso de modificador de atrito comparando com outras situações, trilho seco (sem controle do atrito), trilho molhado e trilho com lubrificante.

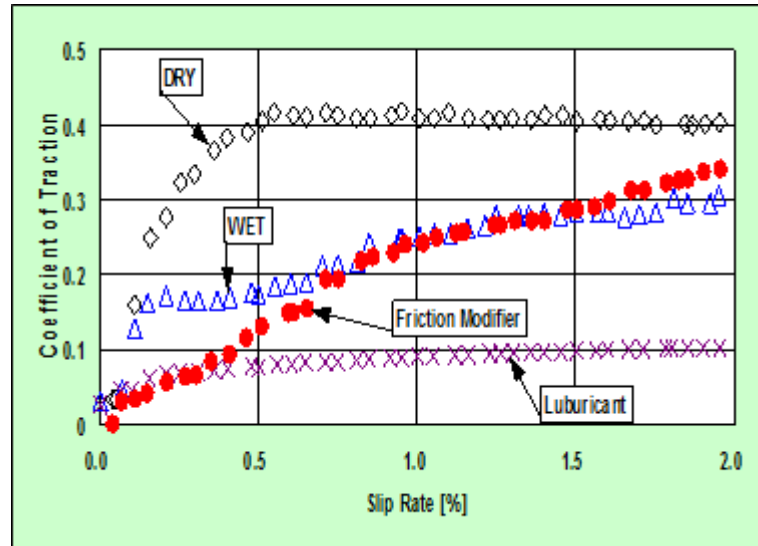


Figura 94: Característica de Fricção Positiva

3.10.2. Enrijecedores de atrito – VHPF (Very High Positive Friction)

São aplicados para aumentar a adesão da locomotiva e estimular o esforço de frenagem. A areia (Figura 95) é amplamente usada para aumentar a adesão das locomotivas, é um material simples, mas cria muitos problemas complexos e dispendiosos, desde a manutenção dos areiros nas locomotivas até o reparo do efeito abrasivo nos trilhos e rodas. Modificadores de atrito VHPF (Figura 96) que pretendem reduzir ou eliminar o uso da areia eleva o coeficiente de tração para níveis de 0,4-0,6. Várias empresas oferecem diferentes tipos de VHPF.



Figura 95: Aplicação de areia, enrijecedor de tração.



Figura 96: Aplicação de gel Enrijecedor de tração.

3.11. Métodos de gestão do atrito

Existem diversas opções para controlar e reduzir o atrito. A melhor opção depende das características de cada ferrovia. Fatores como densidade de tráfego, intervalo para manutenção e carga por eixo são importantes na escolha do tipo de sistema de gestão do atrito.

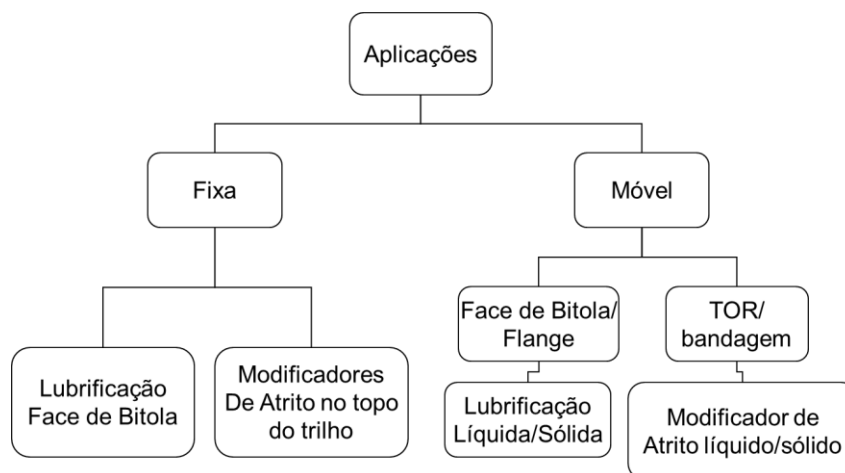


Tabela 9: Métodos de gestão do atrito.

3.11.1. Métodos de aplicação da lubrificação na face de bitola do trilho/flange da roda

A aplicação de um lubrificante de alto desempenho pode manter o atrito na interface entre o flange da roda e a face de bitola do trilho tão baixo quanto o possível. O desgaste nesta interface ocorre quase exclusivamente no trilho externos das curvas, onde a combinação de altas pressões de contato e movimento relativo (*creepages*) resultam em uma significativa dissipação de energia

através de elevadas temperaturas, ruído e, o mais importante, o desgaste da roda e do trilho. Reduzindo o coeficiente de atrito entre essas superfícies, a quantidade de energia dissipada e o desgaste resultante são substancialmente reduzidos. (OLDKNOW K. , Controlling friction delivers longer rail life, 2012)

A aplicação de um filme de proteção de lubrificante na face de bitola pode ser realizada de várias maneiras:

- Aplicar bastões lubrificantes sólidos (LCF – *low coefficient of friction*) diretamente na roda;
- Vaporizar lubrificante nas rodas com o trem em movimento;
- Aplicar um filete de graxa na face de bitola através de um veículo rodoferroviário;
- Aplicar graxa através de um equipamento instalado ao lado da via ativado por sensores de roda.

Bastão Lubrificante Sólido - LCF:

Bastão sólido de LCF - Baixo Coeficiente de Atrito é empregado de modo a fornecer efetiva proteção ao desgaste da roda em uma ampla variedade de sistemas ferroviários. Isto inclui sistemas de metrô, locomotivas de carga, VLT's elétricos e outros sistemas.



Figura 97: Aplicação de Bastão Sólido - LCF.

Bastões sólidos de LCF instalados em aplicadores são dirigidos contra a raiz do flange através de uma mola de força constante, sobre os eixos do veículo que foram selecionados. O número e posição dos eixos podem ser customizados de acordo com o veículo e as características da via e ferramentas de modelagem estão disponíveis para este propósito. Aplicadores são instalados tipicamente entre 8 a 50% das rodas.

O material LCF é um composto polimérico e lubrificante sólido projetado para fornecer efetiva lubrificação sob forças de flange muito altas. O material do composto polimérico tem propriedades termo fixas, significando que a substância do composto não vai derreter ou escoar

quando exposto ao calor da rodas, mas permanecerá onde foi aplicado, na interface flange/canto de bitola.

O mecanismo de transferência do filme é inerentemente auto-regulável, ao contrário dos sistemas de spray. Nas vias em tangente, um filme seco de LCF se transfere e acumula na raiz do flange da roda. Isto é controlado pela rugosidade da roda (Figura 98). Quando existe equilíbrio na espessura de filme e o flange de roda a transferência adicional de filme lubrificante é mínima. Quando o flange da roda do eixo guia entra em contato com o trilho externo da curva, a transferência do filme lubrificante ocorre da roda para o trilho, diminuindo assim a “reserva” de lubrificante LCF. A “reserva” é restabelecida quando cessa o contato do flange da roda com o trilho (na saída de curvas-reentradas em tangentes). Os subsequentes contatos roda/trilho distribui o filme de LCF para as outras rodas incluindo aquelas que não têm aplicadores instalados.

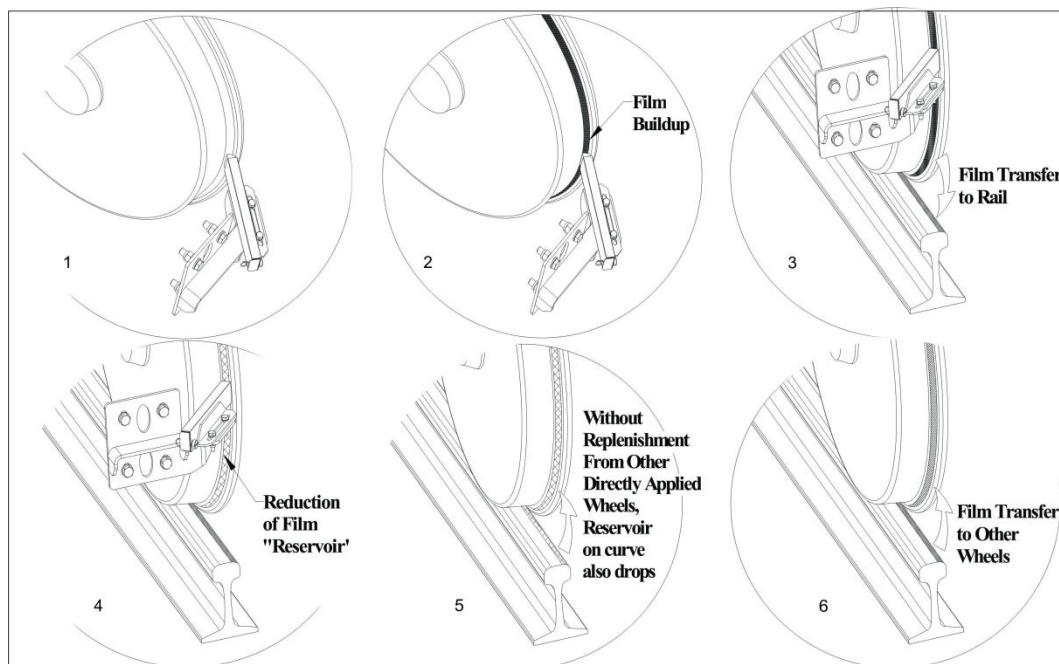


Figura 98: Método de transferência de lubrificante a partir do LCF.

A auto-regulação natural é demonstrada pela variedade de consumo de bastão em sistemas com diferentes graus de curvatura. O percentual de curvatura pode ser tomado como uma aproximação para a avaliação da magnitude de contatos de flange. Trens de alta velocidade usando LCF como o *Eurostar* operando no Reino Unido, França e Bélgica tipicamente tem taxas de consumo de LCF menores nas vias que de baixa curvatura. Pelo contrário, certos metrô com alto número curvas apertadas tem uma taxa de consumo até três vezes maior.

Com um típico percentual de 25% das rodas com aplicação de LCF, o sistema tem um alto grau de redundância de reposição, fornecendo uma lubrificação de alta consistência. Enquanto ocasionalmente no trem alguns aplicadores podem vir a ser avariados ou ficar entupidos, o impacto sobre a eficiência do sistema é mínimo. Sistemas de spray de óleo são menos confiáveis devido ao reduzido número de bicos que podem facilmente ficar desalinhados ou entupidos. O sistema de lubrificação com bastões LCF é também independente do reservatório de ar do trem, outro fator de garantia de alta confiabilidade.

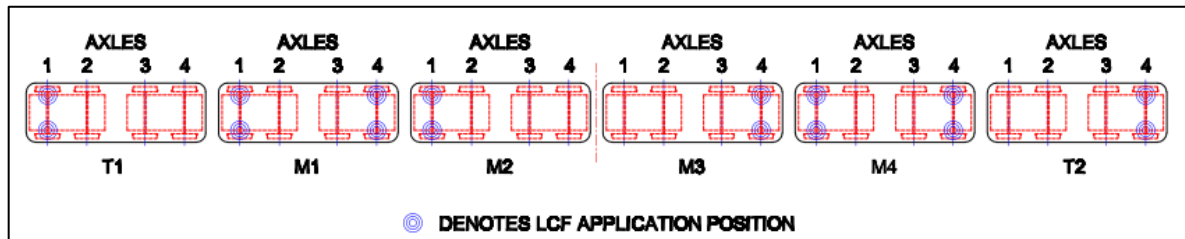


Figura 99: Típica distribuição de LCF em sistemas de metrô.

O uso do bastão lubrificante possui um custo baixo, devido ao sistema de aplicação ser simples. É ambientalmente correto e o desperdício é mínimo. Por outro lado, o consumo de lubrificante é mínimo, assim a proteção poderá ser mínima após a primeira parte do trem. Bastões lubrificantes geralmente são usados em sistema de trânsito, onde o tamanho das composições é pequeno e o equipamento está na oficina frequentemente. Além disso, e mais importante fator é o fato da característica fechada do sistema (geralmente circuitos) significa que a saturação do sistema pode ser alcançada e todas as rodas serão protegidas. Outro uso comum é o uso em rodas tracionadas das locomotivas para diminuir o desgaste. Como a tecnologia está sempre em atualização, a viabilidade do uso de bastão sólido para proteção do desgaste de rodas e trilhos em longos trens está sendo melhorada.

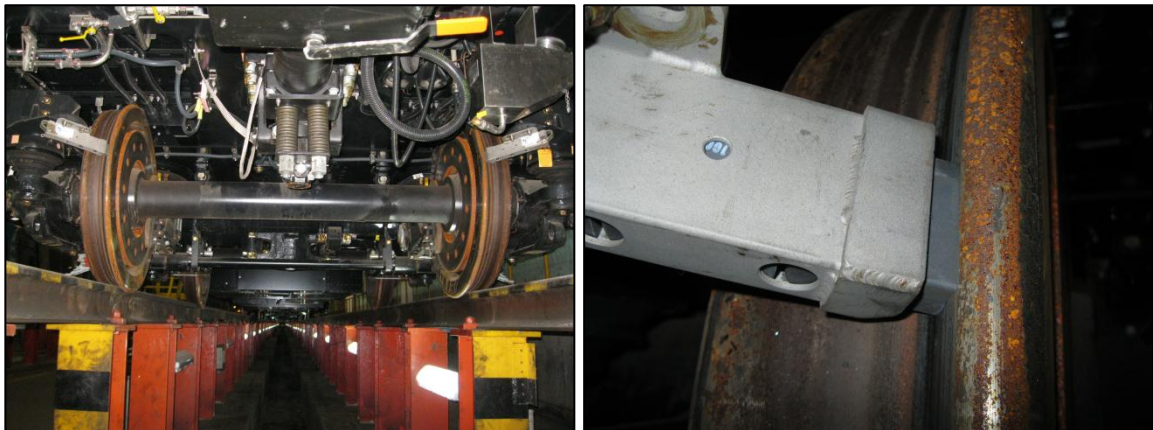


Figura 100: Aplicação do LCF nos novos trens do MetrôRio.

O uso de bastão é comum em sistemas de trânsito (Figura 100), minimiza o desgaste do flange da roda, como o atrito é uma propriedade entre dois corpos, o desgaste do trilho também é minimizado, porém em uma menor proporção.

Aplicação de spray de lubrificante

A aplicação de óleo ou graxa no flange da roda é uma tecnologia consolidada (Figura 101). Em sistemas de trânsito normalmente é usada a aplicação de óleo, áreas onde a aplicação é feita em locomotivas, utiliza-se graxa. A aplicação de spray de lubrificante nas rodas das locomotivas tem sido eficaz, porém requer uma alta confiabilidade do sistema de aplicação, especialmente para trens de cargas, pois o intervalo de cada revisão das loco pode ser superior a três meses.

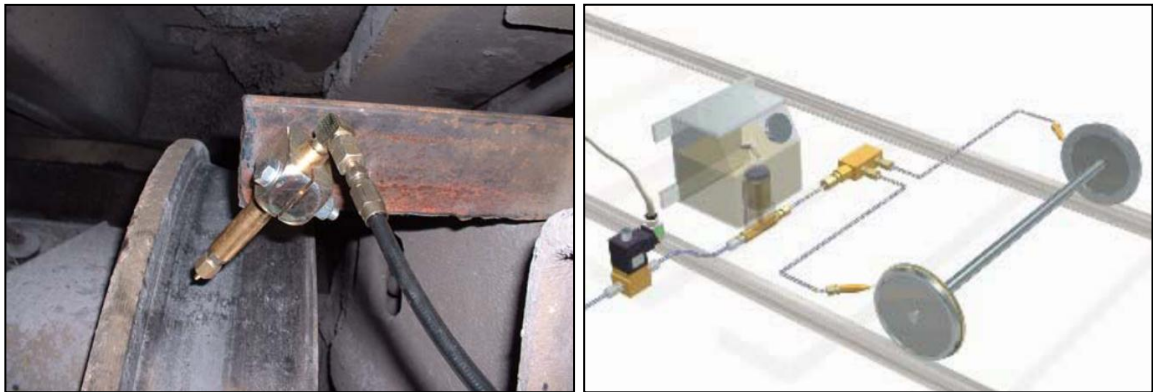


Figura 101: Aplicação de spray de lubrificante.

A maior preocupação é a vaporização do óleo no topo do trilho, o que pode causar problemas de tração e sujeira na parte inferior dos veículos, isto causa a formação de uma pasta de óleo e sujeira nos veículos. A precisão no controle de lubrificante parece ser um desafio.

Aplicação através de veículo rodoferroviário

Algumas ferrovias aplicam lubrificante na face de bitola dos trilhos através de sistemas instalados em veículos ferroviários ou rodoferroviários (Figura 102). É uma maneira de baixo custo e excelente para ferrovias com tonelage de transporte baixa. Como o lubrificante aplicado é consumido após 1-2 longos trens, é menos efetiva onde o tráfego é significativo.



Figura 102: Aplicação de graxa a partir de um veículo rodoferroviário.

O filete de graxa precisa ser distribuído corretamente para evitar a contaminação do topo do trilho pela migração da graxa. O filete é aplicado no ponto de bitola do boleto do trilho, a velocidade do veículo lubrificador e a pressão do sistema de bombeamento interferem diretamente na quantidade de graxa aplicada.

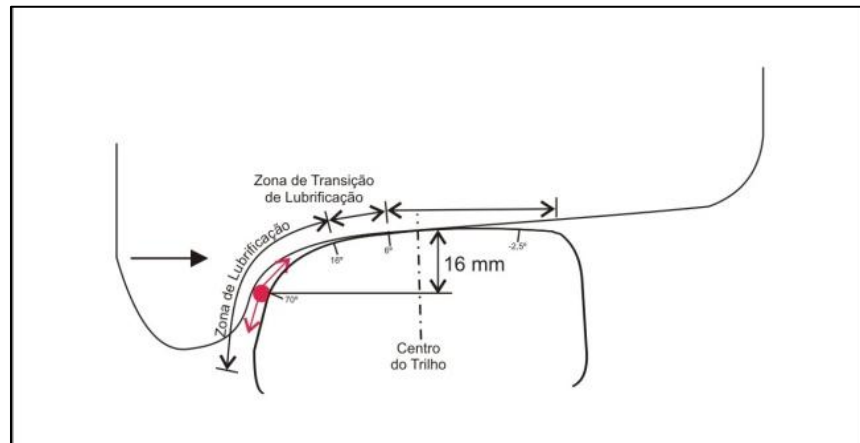


Figura 103: Posição do filete de graxa na face de bitola do trilho.

As irregularidades no boleto do trilho podem interferir na aplicação do filete, soldas mal rebarbadas e juntas abertas podem direcionar o carrinho aplicador para o topo do trilho. Um procedimento operacional deve ser desenvolvido para a aplicação móvel, pois a efetividade da lubrificação é diretamente proporcional ao tráfego dos trens e a frequência de lubrificação.



Figura 104: Verificação do filete de graxa com gabarito.

Aplicação através de lubrificadores instalados ao lado da via

Lubrificadores instalados ao lado da via são a melhor técnica para proteger um território sinuoso ou uma região com grande número de curvas em uma rota, pois asseguram uma camada de proteção suficiente na face de bitola (Figura 105 e Figura 106). Se o objetivo principal é proteger as curvas contra o desgaste ou reduzir a resistência de curva, a solução geralmente é a instalação de lubrificadores ao lado da via. A desvantagem é que os lubrificadores precisam ser mantidos e abastecidos por acesso ferroviário quando não é possível o acesso rodoviário. Isso exige intervalo de via para execução dos serviços.

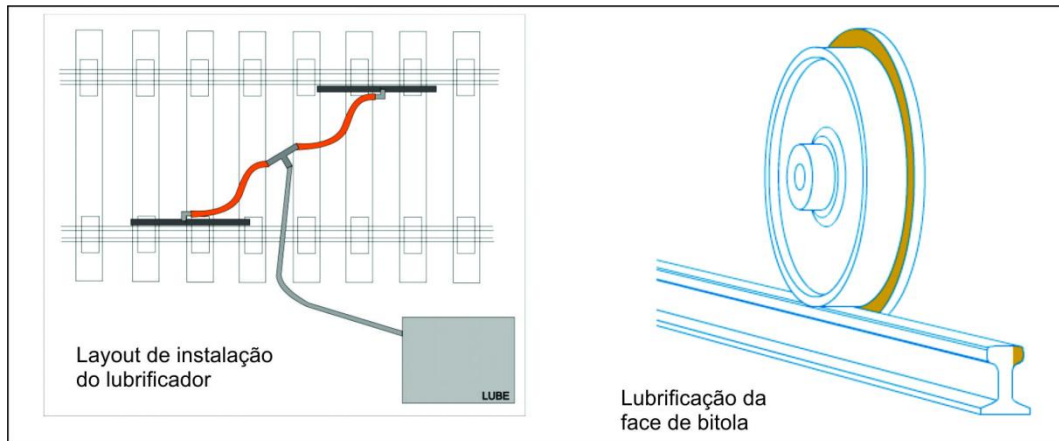


Figura 105: Layout de instalação de lubrificadores da face de bitola.



Figura 106: Instalação típica do lubrificador ao lado da via na MRS Logística.

Lubrificadores fixos possuem reservatório de lubrificante, bomba, mangueiras de distribuição e barras de aplicação, que distribuem a graxa na face de bitola dos trilhos de onde são levadas pelas rodas. Esses lubrificadores poderão ter um pino de acionamento (lubrificadores mecânicos ou hidráulicos) ou um sensor eletrônico de rodas para um melhor controle da lubrificação.

A escolha de um lubrificador confiável é vital para o desempenho da lubrificação, pois precisam aplicar a graxa em quantidade e posição certa na face de bitola que permite ser levadas a longas distâncias pelas rodas, evitando a contaminação do topo do trilho e o desperdício. Eles precisam ser compatíveis com a viscosidade da graxa e ser de simples manutenção.

Melhores práticas para lubrificação da face de bitola do trilho:

Espaçamento e localização de lubrificadores:

O objetivo da lubrificação é manter um mínimo nível de atrito na face de bitola dos trilhos, na maioria dos casos menor que $\mu < 0,25$ em curvas com $R < 582$ m (curvas que apresentam o contato do flange na face de bitola).

Com o uso de lubrificadores modernos, é melhor pensar na quantidade de curvas de diferentes raios que podem ser protegidos como um grupo por um simples lubrificador com efetiva distribuição de graxa. Pode ser instalado na tangente ou na espiral de uma curva. A vantagem da instalação em tangente é uso de barras aplicadoras nas duas filas de trilho; diferentemente quando instalados na transição quando as barras aplicadoras são instaladas apenas no trilho externo, assim o número de equipamentos é minimizado. Pode ser usada uma ou duas barras aplicadoras por trilho (Figura 107).



Figura 107: Barras aplicador Portec/LBFoster MC4-XL com 16 portas e guia de graxas.

Lubrificadores devem ser posicionados para garantir a efetividade da proteção dos trilhos. A localização correta deve ser o ponto de equilíbrio entre as capacidades do lubrificador e da graxa, que possibilitem que a graxa seja carregada por longas distâncias em todas as condições climáticas, e as condições de curvatura, tonelagem transportada, perfil longitudinal da via e velocidade do trem, fatores estes que contribuem no nível de proteção do trilho. Em linhas altamente solicitadas, o uso de lubrificadores controlado eletronicamente é justificado. Eles apresentam maior confiabilidade devido a ausência do contato mecânica da roda com acionadores da bomba de graxa, além de permitirem um fino ajuste na vazão de graxa. Os avanços em eletrônica e tecnologias wireless estão permitindo aos fabricantes de adicionar capacidades de monitoramento remoto aos lubrificadores fixos a um custo acessível, otimizando assim o desempenho.

O espaçamento recomendado entre os lubrificadores pode ser calculado de acordo com a fórmula que fornece um número que é obtido pelo comprimento das curvas versus o grau da curva.

Quando instalados, lubrificadores devem ser posicionados longe de cursos d'água, passagens de nível e aparelhos de mudança de via. Lubrificadores devem ser localizados, onde praticável, entre curvas suaves ou moderadas ($R > 582\text{m}$). Lubrificadores devem ser localizados entre curvas de direções opostas.

Lubrificadores não deverão ser instalados quando:

- Próximos a AMV's, PN, instalações de sinalização e comunicação. Se possível lubrificadores deverão estar distantes pelo menos 30 m de juntas isoladas.

- Em áreas onde os veículos apresentam *hunting* e irregularidades de alinhamento da via.
- Próximos a cursos d'água e locais ambientalmente sensíveis
- Lubrificadores não devem ser instalados em pontos de parada, pontos de aplicação de areia.

A utilização de painéis solares talvez seja a mais barata energia para o funcionamento dos lubrificadores em vez de ligar os lubrificadores na rede elétrica. Quando o uso do painel solar é pretendido, o local de instalação deverá estar exposto a radiação solar por adequados períodos do ano.

O perigo de deslizamentos de encosta deverá ser considerado antes da instalação dos equipamentos.

As condições de tráfego da via afetam diretamente o desempenho do lubrificador. Vias com tráfego unidirecional apresentam o melhor desempenho quando ao carregamento da graxa pelas rodas (*carry-down*), enquanto em vias com tráfego bidirecional o carregamento é menor.

Condições roda-trilho

As condições roda-trilho tem grande influência para lubrificação fixa, por exemplo, é conhecido pela indústria ferroviária que é mais difícil de fornecer uma efetiva proteção ao desgaste nas curvas quando o tráfego ferroviário é predominantemente descendente e exige a aplicação constante de freio. Isto resulta na necessidade de posicionar os lubrificadores mais próximos a fim de compensar o efeito da alta temperatura das rodas. A alta temperatura é a influência primária nestas condições, porém as pressões do contato roda-trilho também são importantes. (EADIE D. T., LU, SANTORO, & OLDKNOW, 2011)

O efeito das condições de contato pode ser ilustrado na Figura 108. O gráfico mostra os coeficientes de atrito medidos antes e após o esmerilhamento. As mudanças no perfil do trilho resultaram em maiores coeficientes de atrito. É razoável admitir que altas pressões de contato na interface canto de bitola/flange da roda após o esmerilhamento estão resultando numa remoção mais rápida do filme lubrificante. (EADIE D. T., LU, SANTORO, & OLDKNOW, 2011)

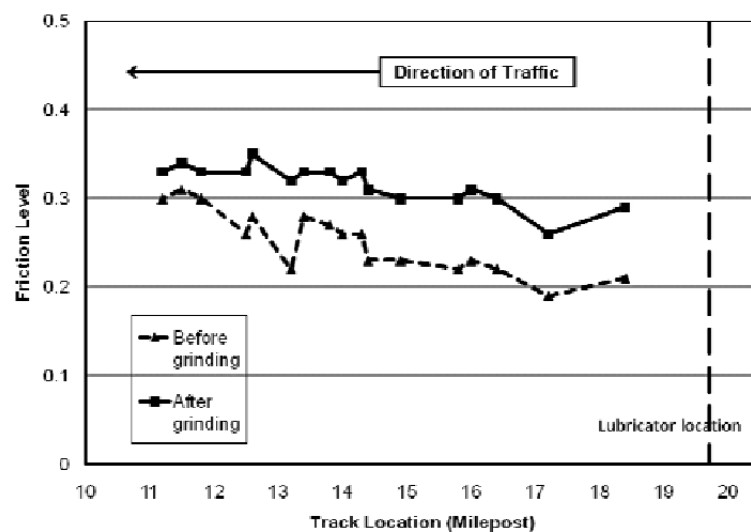


Figura 108: COF antes e após e Esmerilhamento de Trilhos.

Ajuste da vazão de lubrificantes

De acordo com (IHTA, 2009), a configuração de um lubrificador deverá ser aquela na qual um volume de lubrificante despendido é suficiente para alcançar os coeficientes de atrito desejado até uma distância de 1,5-5 km em cada direção, ao mesmo tempo em que a configuração não seja tão alta que permita a ocorrência de arremessamento de graxa pela roda na barra aplicadora (*fling-off*).

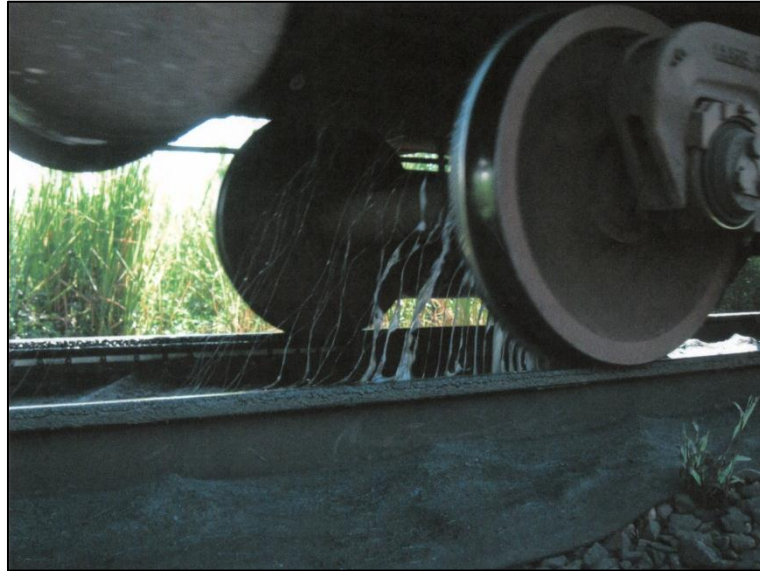


Figura 109: Excesso de graxa na barra distribuído gera arremessamento da graxa (*fling-off*).

Usando lubrificadores eletrônicos, a Canadian Pacific encontrou a ótima configuração de 0,25 segundos de operação do motor para cada 16 rodas, usando barras de aplicação longa. Em grandes grades, essa configuração foi reduzida para 0,25 segundos para cada 32 rodas. É extremamente importante que os lubrificadores sejam mantidos continuamente; uma lubrificação efetiva requer que o filme de lubrificante seja polido no trilho e mantido. Se os lubrificadores funcionarem sem o lubrificante, trincas irão se desenvolver rapidamente na superfície do trilho, após o funcionamento normal do lubrificador. Essas trincas serão preenchidas de lubrificante e talvez tenham o crescimento acelerado. Um período de tempo é necessário para a formação do revestimento de proteção na face de bitola. O reservatório dos lubrificadores deverá ser mantido no mínimo em 2/3 da capacidade para evitar a cavitação quando bombeado. Os novos lubrificadores eletrônicos com monitoramento remoto permitem um diagnóstico contínuo para determinar se estão cheios, bombeando o lubrificante e funcionando.

A Figura 110 apresenta a interface de monitoramento e gerenciamento de um lubrificador, o acesso é realizado pelo site do fabricante do equipamento, as condições de funcionamento são monitoradas.

The screenshot shows a web-based interface for remote management of lubricators. The main content is divided into several sections:

- Controls:** Total Wheels Count: 3,201,680; Wheels To Activate: 12; Wheels To Next Activation: 2; Pump Time Per Activation: 0.25 sec; Locomotive Wheel skip: 12; Direction Setting: A or B; Power Status: ON by Local; Product Volume: 80%; Unit Type: TOR; Unit Model: PIV-800# Single; Total Pump Time: 66709.9 sec; Electric Lid: Closed; Product Lid: Closed; Modem: GPRS.
- Power:** Battery Supply: 13.0 V; Battery min.: 11.5 V; Peak Current: 47.2 A; Average Current: 8.8 A; Pump Cycles last train: 46; Power charging type: Solar.
- Temperature:** Battery Temp: 19.2 °C; Board Temp: 20.6 °C; Ambient Temp: 19.8 °C; Product Temp: N/A.
- Miscellaneous:** Ran: No; Shaft Counter: 0; Shaft Max delta: 0; Last Train: 2012-Jun-14 07:30:43; Last Update: 2012-Jun-14 08:18:02; Timezone: E. South America Standard Time; Tank Serial Number: 6031.
- Last Train:** Train Time: 00:04:20; Train Wheels: 554; Pump Time: 11.50; Approximate Speed: ≈ 38.4 kph.

Figura 110: Interface de gerenciamento remoto dos lubrificadores Portec/LBFoster Protector IV

A lubrificação da face de bitola é utilizada para proteger o desgaste no contato da roda e do trilho, porém ela não deverá evitar o desgaste do canto de bitola e face de bitola do trilho para a formação do contato conformal que combina com a raiz do flange e o flange das rodas. Se o canto de bitola estiver excessivamente lubrificado, onde o desgaste será virtualmente eliminado, o canto de bitola não atingirá o contato conformal necessário para controlar e reduzir as tensões de contato. Assim o canto e a face de bitola irão acumular altas tensões, o que levará a fadiga podendo ocorrer “deep seated shells” (DSS) (Figura 111). A melhor forma de controlar o DSS é reduzir a lubrificação para o perfil do trilho desgastar na forma do perfil da roda e através do esmerilhamento do canto de bitola com esmerilhadoras que podem esmerilhar a 60-70° da vertical para restaurar o perfil do trilho.



Figura 111: Defeito sub-superficial, DSS - Deep Seated Shell, com formação de fratura transversal no trilho. (SROBA, RONEY, MAGEL, & KALOUSEK, 2007)

Experiência DSS da Canadian Pacific Railway (SROBA, RONEY, MAGEL, & KALOUSEK, 2007)

A Figura 112 e a Figura 113 a seguir ilustram uma situação vivida na CP Rail entre 2004 e 2005 após um período (5 meses) de lubrificação 100% efetiva da face de bitola, o desgaste lateral foi totalmente suprimido nas subdivisões de Thompson, Shuswap e Windermere. A Figura 112 mostra perfis de trilhos medidos antes e depois do esmerilhamento, e pode-se observar nenhuma remoção de material no canto de bitola (60°) em uma curva de raio apertado.

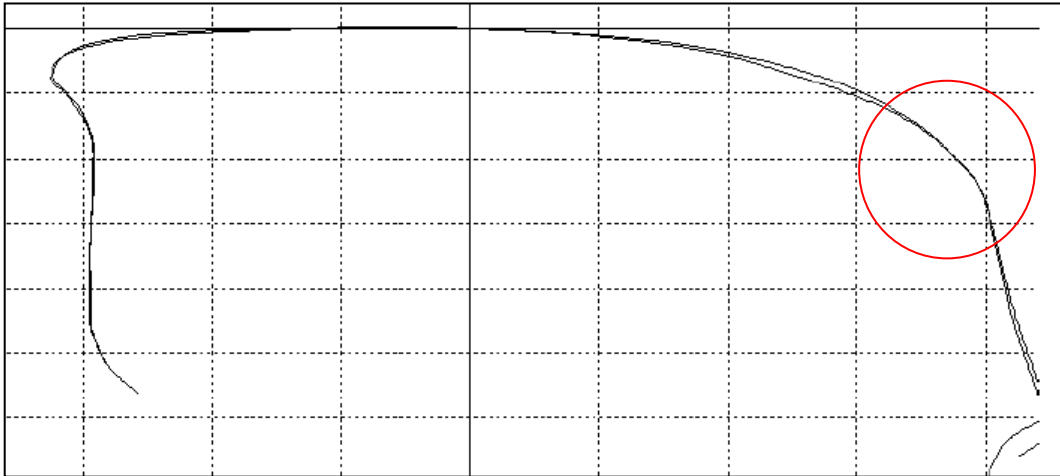


Figura 112: Perfis de trilho antes e depois do esmerilhamento, em destaque nenhuma remoção de material no canto de bitola.

A falta de remoção do material no canto de bitola ocasionou uma epidemia de DSS (*deep seated shell*). A situação só foi resolvida com implantação de novos padrões de esmerilhamento (Figura 113), os quais contemplavam a remoção de material no canto de bitola.

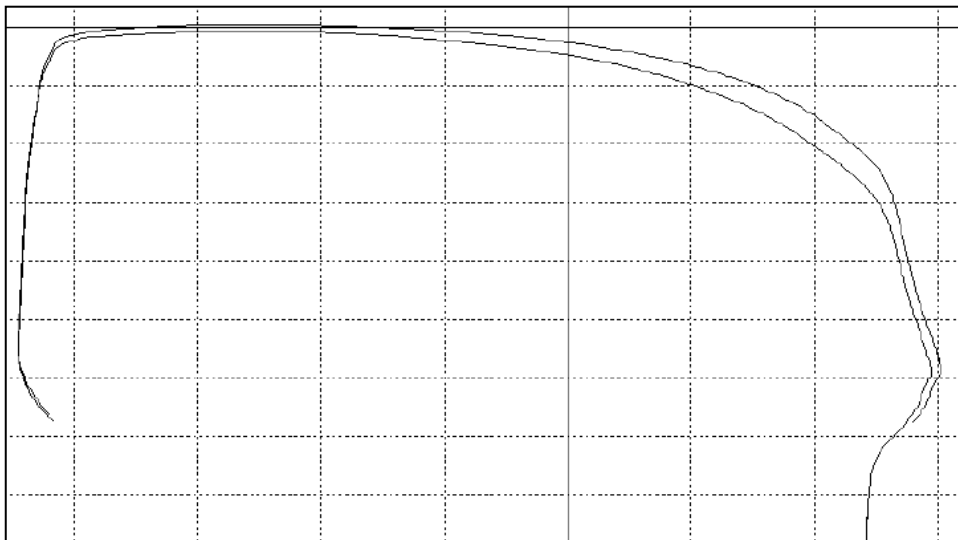


Figura 113: Novo padrão de esmerilhamento, com remoção de material no canto de bitola.

Experiência de DSS na MRS Logística (SILVA, VIDON, RIPPETH, & CALDWELL, 2005)

A Figura 114 abaixo ilustra a ocorrência de fratura devido a RCF de maneira quase epidêmica na Ferrovia do Aço entre 1999/2001 (extensão = 350 km, $R_{mín} = 900m$ e ~ 60 MGT/ano), onde a

partir de 1999 o número de fraturas de trilho cresceu exponencialmente até a ocorrência de quase uma fratura de trilho por DSS (Deep Sealed Shells) por dia em 2001. Tal situação passou a comprometer a capacidade de transporte do trecho com aumento em 100 horas/mês no índice de THP (Trem Hora Parado).

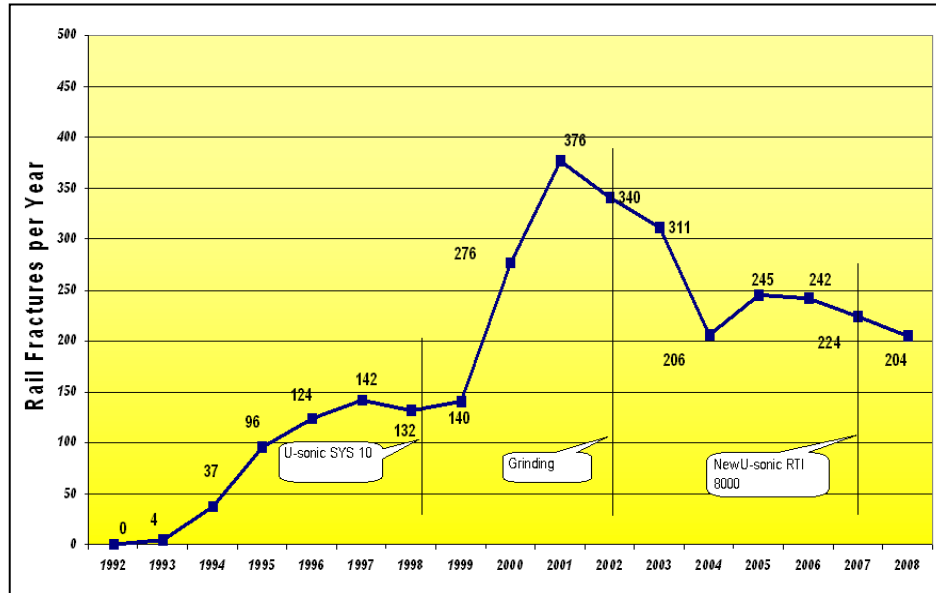


Figura 114: Fraturas de trilho na MRS Logística.

A condição da via na época era de linha totalmente seca, não existia um único lubrificador (COF=0,70 → elevado), nenhum tipo de esmerilhamento de trilho (péssima geometria de contato gerando tensão de contato altíssima) e trilhos de dureza intermediária (BHN = 300/330).

Os dois fatores críticos para o desenvolvimento de RCF, tensão de contato elevada e baixa dureza dos trilhos (baixa resistência ao cisalhamento) associada à condição de COF = 0,70, muito elevado, fez o ponto no “*Sakedown Diagram*” correspondente à condição da Ferrovia do Aço cair totalmente para a direita, na zona de *ratchetting*.

Daí o inevitável crescimento das fraturas de trilhos por RCF e a epidêmica proliferação dos DSS – Deep Seated Shell em locais sem nunca ter sofrido qualquer tipo de lubrificação de trilhos.

A partir de 2002, com a chegada da RGI-48 (*Rail Grinder 48 stones*) executando completa mudança da geometria de contato na interface roda-trilho e emprego de trilhos de alta resistência (BHN > 370) a dramática situação de 376 fraturas de trilhos/ano foi reduzida em 45% em três anos, e atualmente a redução de fraturas de trilhos por RCF na Ferrovia do Aço é superior a 90% quando comparado ao ano 2002.

A existência ainda de COF elevado na Ferrovia do Aço faz que o ciclo de esmerilhamento seja curto, trazendo ônus para outros trechos com necessidade de maior esforço de esmerilhamento.

As duas experiências citadas acima mostram que o aparecimento de DSS não é em função da lubrificação da face de bitola, e sim em função do perfil transversal do trilho que é responsável por gerar altas pressões de contato.

Manutenção

Uma manutenção efetiva de um grande número de lubrificadores é um desafio que muitas ferrovias ao redor do mundo não conseguem vencer completamente. Manter as unidades em operação não é uma atividade de alta prioridade para uma coordenação de via envolvida em outras atividades de manutenção, pois o impacto das unidades fora de serviço não é imediato, ou talvez não seja refletido nas metas da coordenação. O Gerenciamento do Atrito é um investimento de longo prazo, o resultado não aparece imediatamente. Um lubrificador operando continuamente por meses, pode ter o resultado perdido em apenas alguns dias fora de operação ou sem abastecimento de graxa.

A melhor prática para o abastecimento do equipamento é o uso de tanques em um veículo rodoferroviário para abastecimento através de sistema de bombas hidráulicas (Figura 115).



Figura 115: Caminhão de abastecimento com sistema a granel.

3.11.2. Gestão do atrito no topo do trilho

Um desenvolvimento recente é o uso de um filme tecnológico fino e seco para estabelecer um nível intermediário de coeficiente de atrito na interface entre o topo do trilho e a banda de rodagem das rodas. Este nível intermediário de atrito fornece benefícios através da redução de dissipação de energia comparado com o contato “seco” aço contra aço, ao mesmo tempo em que garante atrito suficiente para prevenir qualquer impacto na frenagem e adesão das locomotivas. (OLDKNOW K. , Controlling friction delivers longer rail life, 2012)

Enquanto a lubrificação da face de bitola é uma estratégia defensiva que garante uma camada de proteção entre a roda e o trilho, o controle do atrito no topo do trilho é uma estratégia ofensiva que atua na causa raiz das forças laterais. Controlando o atrito no topo do trilho, as forças laterais de creep são controladas. Essas forças tendem a quadrar o trilho e liberam energia na forma de deformação plástica na superfície do trilho. (IHHA, 2009)

Redução na força lateral é observada quando água ou outro lubrificante convencional está presente no topo do trilho, mas a principal diferença entre o uso de modificadores de atrito está na consistência do efeito. O atrito resultante da camada de óleo lubrificante a base de petróleo no do trilho é extremamente sensível à espessura da camada de óleo. Isto significa que os níveis do coeficiente do atrito serão muito baixo perto do lubrificador e muito alto distantes do lubrificador. Modificadores de atrito produzem um similar nível de atrito para várias faixas de espessura da camada do produto.

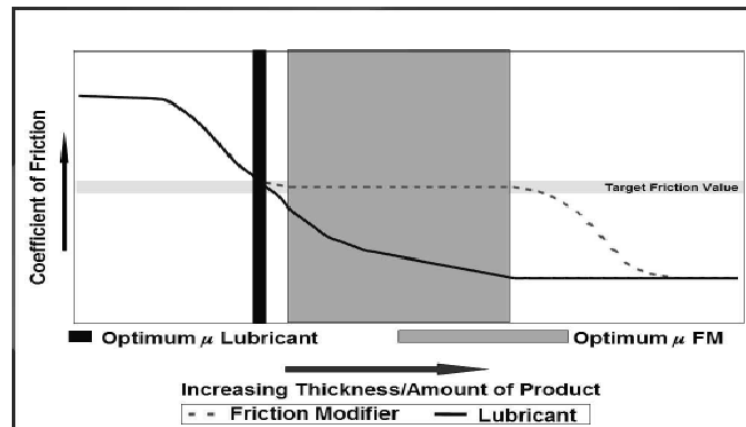


Figura 116: Diferença Conceitual entre Lubrificantes x Modificadores de Atrito. (REIFF, Implementing Top of Rail Friction Control North America Freight Railroad Experience, 2005)

Atualmente, testes controlados indicam que quando o modificador de atrito no topo do trilho é usado combinado com sistemas que reduzem o atrito na face de bitola, os resultados são otimizados. (IHHA, 2009)

Em razão de significantes benefícios do uso de modificadores de atrito no topo do trilho em relação à economia de combustível, o interesse do departamento de operação das ferrovias nesta tecnologia é cada vez maior.

A aplicação de modificador de atrito no topo do trilho pode ser realizada de várias maneiras:

- Aplicar bastões sólidos (HPF – *high positive friction*) diretamente na roda;
- Vaporizar modificador de atrito através de locomotivas ou vagões;
- Vaporizar modificador de atrito através de um veículo rodoferroviário;
- Aplicar modificador de atrito através de um equipamento instalado ao lado da via ativado por sensores de roda.

Bastões Sólidos – HPF

Os bastões sólidos contêm componentes ativos em uma matriz polimérica. Estes produtos são fabricados para serem aplicados diretamente na banda de rodagem das rodas. Sobre uma pressão constante de uma mola, o material do bastão é transferido para roda.

Sob uma pressão constante, o material do bastão de HPF é transferido para a pista de rolamento da roda. Da pista de rolamento o material é transferido para o trilho, a resina do

material é queimada pelas altas temperaturas do contato roda-trilho, deixando assim uma camada microscópica de modificador de atrito seco. O material entra nas asperidades microscópicas da superfície do trilho, fornecendo uma superfície visivelmente mais “suave”. (EADIE., KALOUSEK, & CHIDDICKI, 2000)



Figura 117: Aplicação do HPF.

HPF refere-se à família de materiais desenvolvidos para controlar o atrito no topo do trilho e gerar a fricção positiva no terceiro corpo. Os componentes ativos no HPF consistem em materiais secos, não é usado óleo, graxa ou compostos voláteis orgânicos na composição. O material é não inflamável e não tóxico.

Aplicação através de vagão (COTTER, EADIE, ELVIDGE, & OLDKNOW)

Comparado com sistemas montados em locomotivas, este sistema fornece uma alta utilização do capital, não interfere na escala de manutenção das locomotivas, e é simples, porém robusto. O sistema possui gerenciamento remoto, através de interface web e pode despendar o produto conforme previamente programado de acordo com a localização GPS e relatórios/alarmes são gerados automaticamente (Figura 118).



Figura 118: Sistema de aplicação no topo do trilho montado em vagão.

Aplicação através de veículo rodoferroviário: (EADIE, VIDLER, HOOPER, & MAKOWSKY, 2003)

Um spray de modificador de atrito promove uma rápida evaporação da água, formando uma camada muito fina e uniforme no topo do trilho de modificador de atrito. A Figura 119 ilustra um equipamento aplicador de modificador de atrito rodoferroviário e o aspecto do topo do trilho após a aplicação.



Figura 119: Aplicação de modificador de atrito via veículo rodoferroviário.

O equipamento de aplicação aplica uma quantidade conhecida de modificador de atrito, tipicamente entre 0,25-1,5 litros por 1,6 quilômetros de via, baseado na velocidade do veículo. Uma aplicação típica inclui todas as curvas de uma determinada área, e uma pequena parte da tangente imediatamente a frente da próxima curva.

O modificador de atrito especialmente desenvolvido para aplicação rodoferroviária possui algumas características especiais:

- Viscosidade e bombeabilidade de acordo com o sistema de vaporização
- Características mínimas de fixação e aglomeração
- Máxima retentividade. Esta característica é crítica para aplicação rodoferroviária devido a escassa oportunidade de operação em linhas com alta densidade de tráfego.

Aplicadores TOR ao lado da via: (EADIE, SANTORO, & POWELL, 2001)

Para alcançar todas as vantagens do benefício do uso do modificador de atrito no topo do trilho um requerimento chave é a confiabilidade e efetividade da distribuição do material no topo do trilho.

A Figura 120 apresenta o layout de instalação de um aplicador TOR instalado ao lado da via.

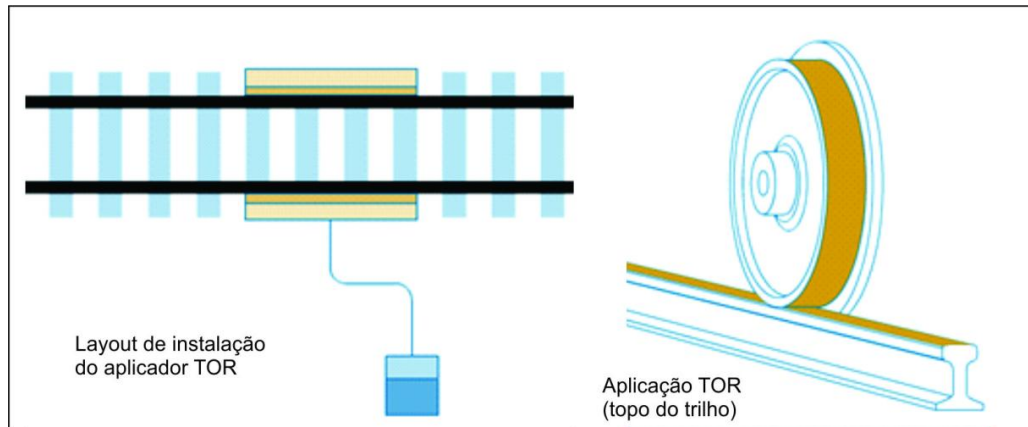


Figura 120: Layout de instalação de aplicadores TOR.

Os aplicadores instalados ao lado da via oferecem uma série de vantagens, tais como:

- Aplicação num local específico. O produto só é distribuído onde é necessário: por exemplo, em uma curva ruidosa.
- Ferrovias e sistemas de trânsito são acostumados a usar um aplicador instalado ao lado da via para lubrificação da face de bitola. Aplicadores topo do trilho (TOR) são similares ao equipamento da face de bitola,
- Implementação é relativamente fácil quando comparada com outros aplicadores.

Os desafios fundamentais para desenvolver um equipamento instalado ao lado da via para a distribuição de modificador de atrito são:

- Depositar o material líquido no topo do trilho de maneira que o material permaneça no lugar certo até que as rodas possam pegar o material e carregá-lo para curva;
- Depositar o líquido o qual possa ser efetivamente transferido para a banda de rodagem das rodas sem significante desperdício;
- Distribuir o modificador de atrito de maneira que otimize o processo de carregamento pelas rodas;
- Controlar precisamente a taxa de distribuição do modificador de atrito para que os objetivos desejados sejam alcançados com a mínima quantidade de material requerida.

A barra aplicadora do modificador de atrito é apresentada na Figura 121.



Figura 121: Barra aplicadora de modificador de atrito LBFoster TOR-ML.

Série de equipamento “Protector”

Introduzido no meio dos anos 80, os aplicadores Protector tem sido desenvolvido de forma simples, mas muito efetivo. O sensor de rodas detecta cada roda dos trens sem contato físico. O sinal do sensor é conectado a controles elétricos, os quais são facilmente ajustados para o máximo controle de distribuição do produto.



Figura 122: Instalação típica do aplicador TOR ao lado da via na MRS Logística.

O sistema de controle fornece dois ajustes para distribuição:

- Configuração do contador de rodas: este controle ajusta a frequência de distribuição. A distribuição é ativada depois que o número escolhido de rodas for contado;
- Tempo de funcionamento da bomba: este controle ajusta a duração de distribuição (tempo de bombeamento).

Usando estes dois controles simples, a taxa de distribuição pode ser ajustada precisamente para diferentes condições de via e locais variáveis.

Os aplicadores Protector possuem dois compartimentos. Um compartimento está localizado todos os componentes do sistema, enquanto o outro armazena o modificador de atrito. Os aplicadores estão disponíveis com duas opções de alimentação, AC e DC com painel solar.

Melhores práticas para aplicação topo do trilho:

Os aplicadores TOR são instalados em tangente, e algumas situações devem ser observadas: (CARMO, VIDON, EADIE, OLDKNOW, & LOPES, 2011)

- Distância mínima de 30 metros da entrada da curva,
- Na região de instalação e adjacências, os trilhos não devem apresentar defeitos superficiais;
- A largura do ponto de contato na região de instalação deve ser pelo menos 30 mm;
- Variações de bitola e superelevação;
- Zona de Entrada, os primeiros aplicadores TOR devem ter espaçamento menores;

- Regiões onde freio a ar é aplicado deverão ter taxa de aplicação diferente.

Diferentes estudos tem sido consistentes em determinar a efetividade do produto em reduzir forças laterais na ordem de 30-40% em torno de 3,3 quilômetros na direção do tráfego a partir do ponto que o produto é aplicado, dependendo da gama de curvas na região. O espaçamento de 3,2 quilômetros poderá ser suficiente para alcançar a proteção completa em regiões de curvas apertadas; espaçamentos maiores poderão ser obtidos em regiões de curvas moderadas. Na zona de entrada (região onde começa a aplicação do TOR), o espaçamento entre os dois primeiros aplicadores deve ser menor, pois as rodas que trafegaram sobre os trilhos secos possuem óxidos de ferro em suas superfícies, e os primeiros aplicadores irão condicionar as rodas com o modificadores de atrito. É recomendado diferentes ajustes para rampas descendentes e ascendentes. Um trilho novo com pequeno raio na superfície do boleto (*crown radius*) e altas tensões de contato tende a distribuir menos modificador de atrito que trilhos com maior raio na superfície do boleto, normalmente trilhos gastos. Remover o escoamento plástico no lado de campo do trilho talvez seja necessário antes da instalação.

Capítulo 4 - Metodologia de mensuração dos benefícios

Em conjunto com a implantação do gerenciamento do atrito é necessário o monitoramento de alguns parâmetros para garantir o sucesso do projeto. “Não se pode administrar o que não se pode medir”. (MORRIS A. COHEN)

4.1. Medição do coeficiente de atrito

4.1.1. Tribômetro Portátil

Antigamente o método usado para avaliar a efetividade da lubrificação da face de bitola era o monitoramento da temperatura dos trilhos durante a passagem dos trens. Com o desenvolvimento do tribômetro portátil a lubrificação de trilhos tornou-se mensurável, a qualificação da lubrificação tornou-se possível.

O Tribômetro portátil, desenvolvido pela AAR mede a força de atrito nos trilhos e automaticamente calcula o coeficiente de atrito, o propósito principal do equipamento é avaliar a lubrificação de trilhos ferroviários. A força de atrito no ponto de contato da roda de medição é determinada por um processo de frenagem similar aos sistemas de frenagem automáticos presentes em novos automóveis. O tribômetro tem um sistema de controle automático que compreende o ponto de saturação da força de *creep* longitudinal. O microcomputador instalado na cabeça de medição é capaz de determinar o ponto máximo de adesão (*creep force*). (IHHA, 2001)

O tribômetro (Figura 123) é capaz de medir o coeficiente de atrito no topo do trilho e na face de bitola separadamente, basta ajustar a roda de medição na posição desejada.



Figura 123: Tribômetro portátil à esquerda, posição onde é medido o COF à direita.

A Figura 124 mostra um gráfico com as medições do tribômetro realizada numa grande extensão de linha. O gráfico mostra o coeficiente de atrito no canto de bitola ao longo da via. No mesmo gráfico é possível visualizar a posição dos lubrificadores (linhas pontilhadas verdes) e o perfil longitudinal da via (linha roxa).

As medições do coeficiente do atrito devem ser realizadas com certa frequência para garantir o perfeito funcionamento da lubrificação. É importante sempre avaliar o COF no topo de ambos os trilhos quando a realizar a medição do COF no canto de bitola, para garantir que o topo do trilho não está contaminado de graxa.

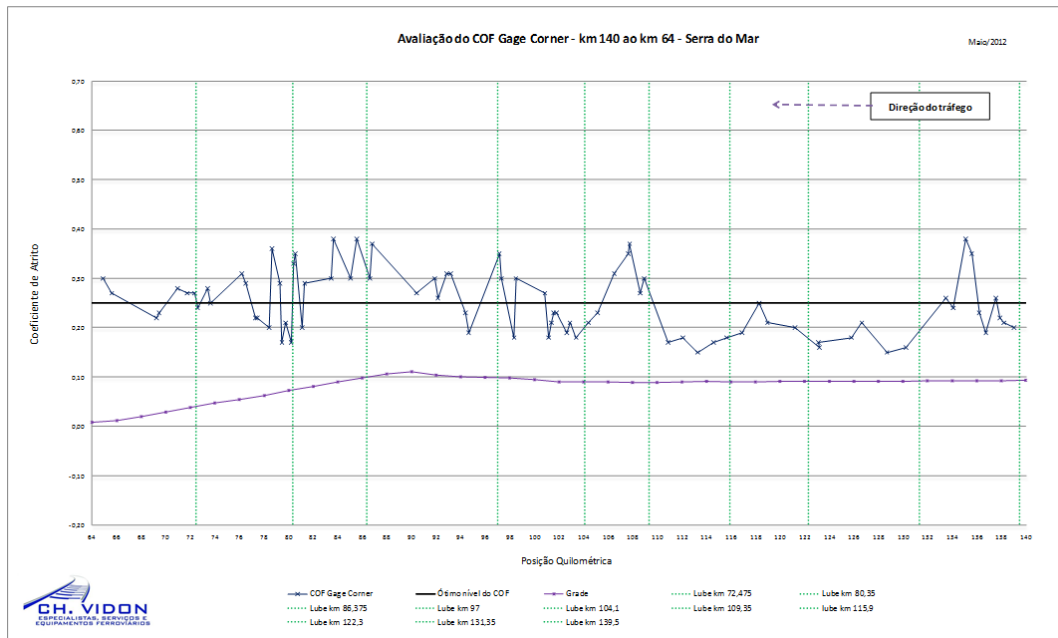


Figura 124: Exemplo de gráfico de medição do COF.

4.1.2. Tribômetro de Alta Velocidade (IHHA, 2001)

O tribômetro de alta velocidade está disponível para ferrovias da América do Norte. Diferentemente do tribômetro portátil, o tribômetro de alta velocidade mede o ponto de saturação da curva do *creepage* induzindo o *creep* lateral.

O tribômetro de alta velocidade é capaz de medir o coeficiente de atrito ao longo de extensões de linha em uma velocidade de até 50 km/h. Os dados dos valores do atrito do topo e da face de bitola de ambos os trilhos são coletados simultaneamente e armazenados no banco de dados. Os dados são úteis em vários propósitos, como por exemplo, ajuste do espaçamento dos lubrificadores e manutenção dos sistemas de lubrificação.



Figura 125: Tribômetro de alta velocidade.

4.2. Acompanhamento do desgaste do trilho

O acompanhamento do desgaste de trilho é fundamental para garantir a efetividade do gerenciamento do atrito, para isso a ferramenta mais utilizada é o perfilmetro digital de trilhos Miniprof.



Figura 126: Medição do perfil do trilho com Miniprof.

A metodologia utilizada é o cálculo das taxa de desgaste natural e artificial e relacioná-las com a quantidade de milhões de toneladas brutas trafegadas (MTBT) durante o período de monitoramento. As medições são realizadas sempre antes e depois dos serviços de esmerilhamento de trilhos.

A Figura 127 apresenta a tela do Miniprof Software.

Taxa de desgaste natural:

É o desgaste vertical e o desgaste lateral do trilho durante certo período de tempo. A taxa de desgaste natural é expressa em mm/MTBT.

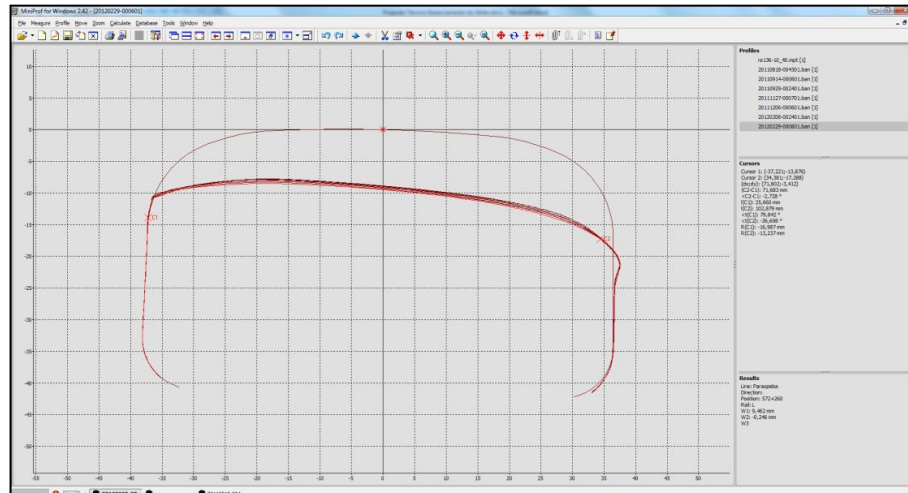


Figura 127: Tela do Miniprof Software.

Taxa de metal removido no esmerilhamento – desgaste artificial:

A taxa de metal removido pela Esmerilhadora de Trilhos é obtida através de medições do perfil do trilho antes e depois do serviço de esmerilhamento. Com isso, é possível subtrair o metal removido do desgaste, obtendo assim a taxa de desgaste natural.

$$W_{natural} = \frac{W - W_{esmerilhamento}}{MTBT} \left(\frac{mm}{MTBT} \right)$$

Com essa metodologia teremos a análise de três desgastes: desgaste lateral e desgaste vertical nos trilhos externos, e desgaste vertical nos trilhos internos (Figura 128).

O desgaste vertical será tratado com o emprego do modificador de atrito enquanto o desgaste lateral será tratado com o emprego da lubrificação de face de bitola.

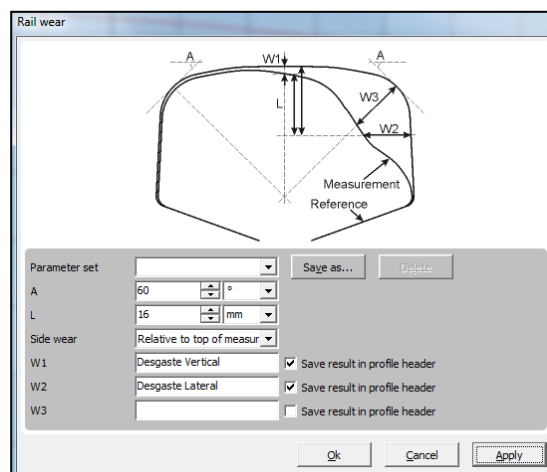


Figura 128: Identificação dos desgastes do trilho no Miniprof Software.

W_1 = desgaste vertical do boleto do trilho

W_2 =desgaste horizontal do boleto do trilho

4.3. Medição de Forças L/V

É utilizado para medir a efetividade da aplicação do modificador de atrito, pois como o produto permanece em maior quantidade na banda de rodagem das rodas, não é possível conhecer o COF obtido após aplicação de modificador de atrito com medições diretas. A magnitude da força lateral é específica para cada curva e é dependente de vários parâmetros, incluindo perfis de roda e trilho, condição do truque, condições da fixação e dormentes, velocidade do trem, carga por eixo e nível de atrito.

Para avaliação da força lateral é necessário a instalação de instrumentação L/V (Figura 129), que consiste num sistema baseado em *strain gages* soldados nos trilhos no qual é possível medir a magnitude da força lateral. O sistema L/V mede as forças L/V continuamente.



Figura 129: Módulo L/V.

A Figura 130 ilustra a distribuição de força lateral obtida por um sistema L/V.

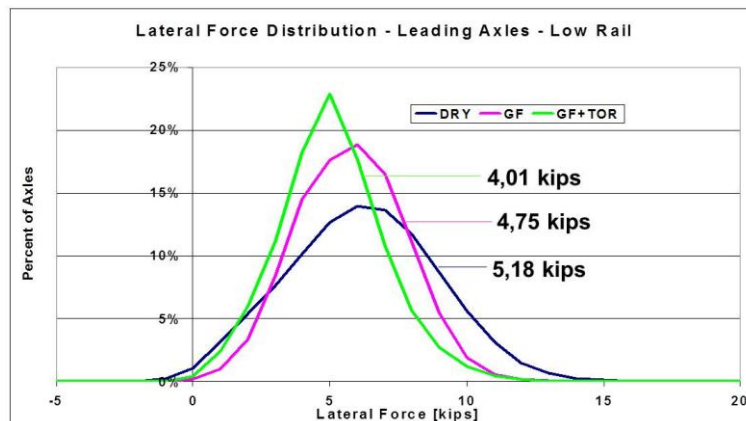


Figura 130: Redução de forças laterais com aplicação do TOR.

4.4. Ensaio de líquido penetrante

O ensaio de líquido penetrante (Figura 131) é realizado para verificar o nível de infestação de trincas de RCF. Com o uso da tecnologia de controle do atrito no topo do trilho, a tendência é a diminuição de trincas de RCF, fato que pode ser comprovado com o uso deste ensaio.



Figura 131: Ensaio de líquido penetrante: à esquerda trilho com controle do atrito no topo, e a direita trilho sem o controle do atrito.

Capítulo 5 – Sinergias entre esmerilhamento de trilhos e gerenciamento do atrito

A interface roda-trilho representa um complexo ambiente operacional e de solicitação dos materiais com diferentes configurações de contato associados a diferentes tipos de tensões. As configurações do contato e da tensão variam em função de parâmetros da via e operacionais, tais como: curvatura, superelevação, velocidade do trem, condição da roda e do trilho. As tensões associadas incluem a tensão crítica do contato roda-trilho além de tensões adicionais provenientes da flexão do trilho, tensões térmicas e tensões provenientes da aceleração/frenagem dos trens. Estas tensões são críticas para definir a vida útil e o desempenho dos trilhos. (ZAREMBSKI, 2011)

Por exemplo, o contato roda-trilho em vias tangentes com boa manutenção geralmente é centralizado no eixo de simetria do trilho, e a distribuição das tensões é mostrada na Figura 132. A magnitude da tensão é relacionada com o local do contato e sua geometria, os quais são definidos pelo perfil do trilho e o raio da roda, bem como sua relativa posição (função da curvatura, superelevação e velocidade do trem). (ZAREMBSKI, 2011)

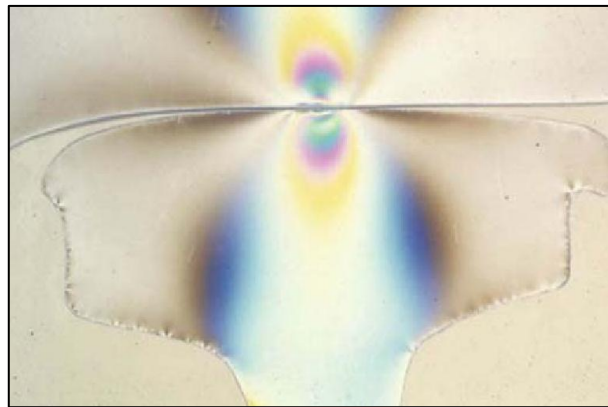


Figura 132: Distribuições de tensões no contato centralizado. (ZAREMBSKI, 2011)

Em curvas, o contato pode ser de dois pontos, como mostrado da Figura 133, o que inclui o contato do flange na face de bitola e o contato da pista de rolamento da roda no topo do trilho.

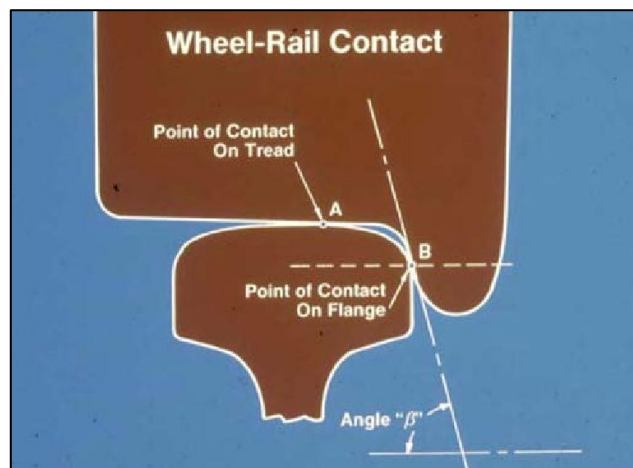


Figura 133: Dois pontos de contato no trilho externo. (ZAREMBSKI, 2011)

Alternativamente em curvas poderá ocorrer nos trilhos externos um ponto de contato como mostrado na Figura 134, onde a raiz do flange contata o canto de bitola num simples ponto. Neste caso, as forças laterais e verticais são concentradas numa simples área de contato na face de bitola que resultam numa alta concentração de tensões. Enquanto um ponto de contato geralmente resulta em altas tensões localizadas, mudando o tipo de contato para dois pontos de contato, podendo resultar na perda da capacidade de inscrição dos truques na curva e conseqüentemente um aumento da força lateral. Isto aumenta o desgaste da face de bitola com também o potencial de abertura dinâmica de bitola. (ZAREMBSKI, 2011)

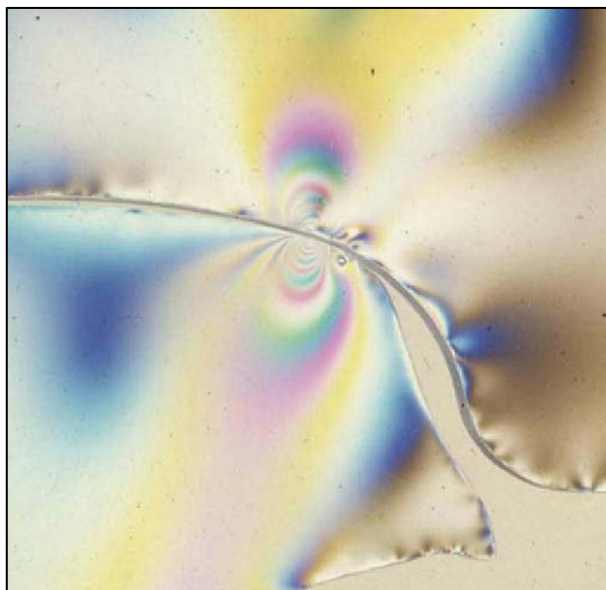


Figura 134: Tensões geradas por um ponto de contato no trilho externo. (ZAREMBSKI, 2011)

As variações nas configurações de contato e relações de tensões irão influenciar o modo de degradação do trilho. Essas variações podem ser influenciadas e minimizadas pelas atividades de manutenção, especialmente o esmerilhamento de trilhos, que modifica e otimiza o contato roda-trilho e suas respectivas tensões. (ZAREMBSKI, 2011)

O esmerilhamento do trilho refere-se ao método de controlar e manter o perfil do trilho. O esmerilhamento vai além da básica remoção do defeito, ele visa modificar o perfil do boleto do trilho e a geometria do contato roda-trilho. Assim o esmerilhamento envolve um específico perfil do boleto do trilho, o qual permite definir a localização do contato roda-trilho. (ZAREMBSKI, 2011)

Em geral o esmerilhamento engloba três amplas áreas da manutenção do trilho: (ZAREMBSKI, 2011)

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

Os benefícios da prática de esmerilhamento na manutenção do trilho são associados ao aumento do desempenho do trilho e extensão da vida útil. Adicionais benefícios são associados à redução do carregamento dinâmico roda-trilho, ou seja, a redução da carga de impacto vertical e redução das forças laterais dinâmicas. (ZAREMBSKI, 2011)

Segundo (MAGEL E. , 2011), o esmerilhamento de trilho é um processo bem estabelecido para redução da taxa de desenvolvimento de RCF e para remoção de danos (trincas) na superfície do trilho. O esmerilhamento para esse objetivo possui três funções primárias e básicas:

1. Remoção das trincas e dos danos já existentes na superfície do metal. Existem três razões para isso:
 - I. Remoção das trincas antes que elas propagem profundamente no interior no boleto e causem mais danos, ex.: *shelling* e fratura de trilho.
 - II. Melhorar a capacidade de testes de ultrassom, pois os sinais são refletidos pelas trincas.
 - III. O material trincado possui reduzida resistência e permite continuada deterioração do perfil do trilho. No esmerilhamento preventivo o objetivo é remover fina camada severamente deformada da superfície do trilho que ainda não esteja trincada mas será trincada brevemente.
2. Retornar o perfil do boleto do trilho para o perfil desejado. O perfil ideal é necessário para controlar e gerenciar o desempenho do contato roda-trilho (ex.: tensões de contato, capacidade de inscrição e estabilidade do rodeiro).
3. Corrigir e minimizar os defeitos da superfície do trilho tais como: *squats*, patinação, corrugação e soldas canoadas.

As melhores práticas relacionadas ao intervalo de esmerilhamento e a remoção de metal em cada ciclo estão em contínua evolução. Embora haja consenso que o esmerilhamento aumenta a vida útil dos trilhos, o compromisso entre o custo do esmerilhamento frequente (preventivo) e o aumento da vida útil do trilho é frequentemente discutido.

A melhor prática de esmerilhamento existente na América do Norte para ferrovias heavy haul tem evoluído nas últimas três décadas. O esmerilhamento foi introduzido em 1960 quando altas cargas por eixo sobre trilhos de baixa resistência resultaram na rápida formação de corrugação no trilho interno, que reduziu a vida útil do trilho a valores tão baixos como 50 MGT. Foi introduzido então o esmerilhamento anual pesado de múltiplos passes com a esperança de aumentar a vida útil do trilho. Mesmo com o esmerilhamento pesado, a corrugação não foi controlada. Algumas ferrovias adotaram esmerilhamento duas vezes por ano e mesmo assim ficou evidente que a corrugação jamais seria totalmente removida juntamente com as trincas profundas se formavam nos vales dos defeitos da corrugação. Embora o impacto do esmerilhamento fosse positivo, este foi denominado como um procedimento de correção (esmerilhar depois que o defeito torna-se severo), que poderia ser melhorado dobrando a frequência de esmerilhamento. Isto evoluiu para a concepção que o ciclo de esmerilhamento deveria ser baseado na tonelagem em vez do tempo. Uma vez que a filosofia de esmerilhamento frequente baseado na tonelagem e no perfil específico do trilho, a ideia de esmerilhamento preventivo foi lançada. Esta nova estratégia de esmerilhamento a corrugação foi gradualmente removida e mantida sob controle. (MAGEL E. , 2011)

Nas ferrovias metropolitanas e metrô o desenvolvimento de esmerilhamento de trilho ocorreu por acaso. Em algumas operadoras nunca houve qualquer tipo de esmerilhamento, seja por ignorância ou simplesmente falta de gabarito para operação da máquina. Outros impedimentos são: produção de pó e fogo devido ao esmerilhamento e baixa tonelagem anual (o esmerilhamento

preventivo poderia ser realizado uma vez por década). A prática atual é usar o esmerilhamento apenas quando o trilho apresenta alto grau de deterioração, sendo a única opção contra a troca de trilho. (MAGEL E. , 2011)

Então o esmerilhamento de trilhos evolui para uma técnica de manutenção inserindo total controle no processo de fadiga da superfície do trilho e escoamento plástico.

A Figura 135 ilustra a ação do rebolo de esmerilhamento e o aspecto da superfície do trilho recém-esmerilhada.



Figura 135: Rebolos de esmerilhamento a esquerda e aspecto do trilho esmerilhado a direita. (SROBA P. , 2012)

A inclinação do motor e rebolo de esmerilhamento é necessária para obtenção do perfil ideal do boleto do trilho (Figura 136).

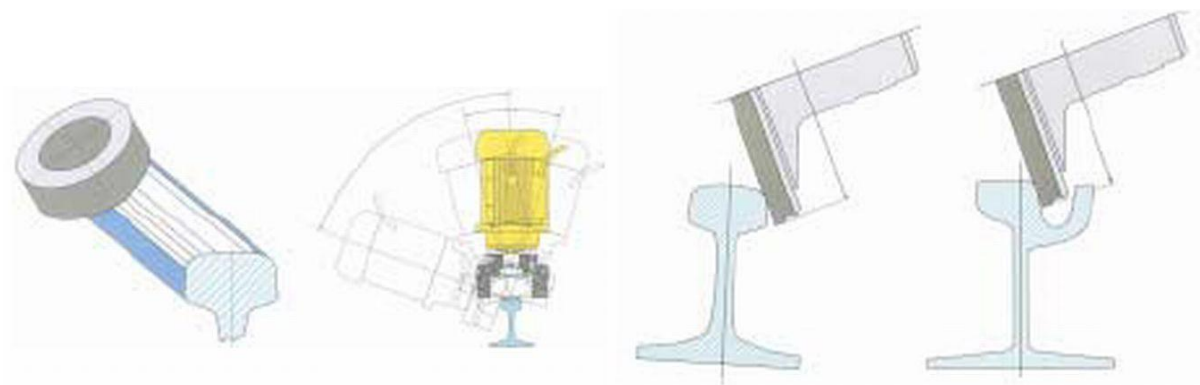


Figura 136: Angulação do motor e rebolo de esmerilhamento. (ESVELD, 2001)

A Figura 137 ilustra uma máquina esmerilhadora de grande porte em operação na ferrovia americana CSX e a Figura 138 ilustra a máquina esmerilhadora da MRS Logística.



Figura 137: RG-10 em operação na CSX em 2001.



Figura 138: Esmerilhadora RGI-48 da MRS Logística.

A evolução das máquinas esmerilhadora é apresentada na Figura 139, antigamente os controles eram analógicos; a máquina atual é controlada por PLC (*Programmable logic controller*).



Figura 139: Comparação entre as cabines de uma máquina esmerilhadora antiga e uma nova.

O controle da qualidade do esmerilhamento é realizado por meio de comparação dos perfis desejado e o executado (Figura 140).

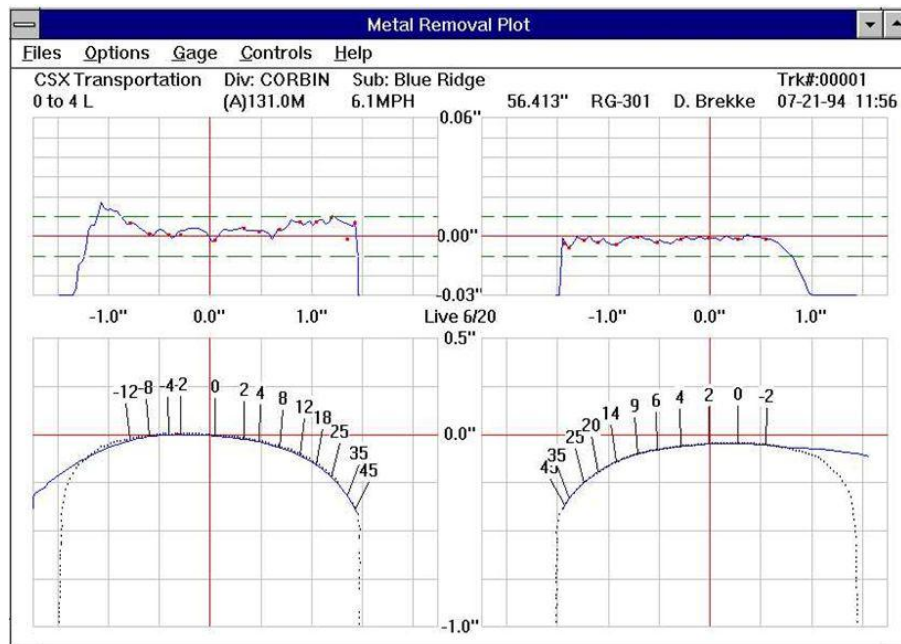


Figura 140: Tela do controle do perfil do trilho de uma máquina esmerilhadora.

Linhas de altas cargas por eixo são caracterizadas por frequente ocorrência de distorção da superfície e forma do perfil devido a escoamento plástico. Em linhas mistas, o conforto e a supressão de ruídos talvez seja o maior problema, enquanto intervalos para manutenção de via é muito limitado. Apesar de muitas práticas diferentes ao redor do mundo, os objetivos do esmerilhamento são os mesmos:

- Tentativa de manter um equilíbrio entre os mecanismos de desgaste para prever a prematura substituição devido à fadiga superficial ou subsuperficial do trilho;
- Facilitar a inscrição e a estabilidade dinâmica dos veículos;
- Controlar as condições da superfície do trilho que podem provocar altas cargas dinâmicas e vibração da via;
- Controlar o contato roda-trilho e as características de interação.

Uma contínua e frequente remoção de pequena quantidade do material da superfície do trilho através do esmerilhamento pode estancar e, eliminar a propagação inicial de trincas. (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)

A taxa ideal de remoção do material da superfície do trilho capaz de inibir o início e propagação destas avarias superficiais e estender a vida útil dos trilhos é chamada de Taxa Mágica de Desgaste (“The Magic Wear Rate” - MWR). Esta taxa depende de circunstâncias particulares do trilho, como tensão normal de contato, tração, condições metalúrgicas, lubrificação, geometria, umidade, dentre outras e é usada como base na estratégia de esmerilhamento. (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)

Se a taxa de desgaste é maior ou igual à taxa cumulativa de deformação plástica (ratchetting), a ductilidade do material não será exaurida e as trincas de RCF não ocorrerão. A taxa de desgaste que atinge a taxa de exaustão da fadiga da camada superficial do material é referida como taxa mágica do desgaste

Estratégias diferentes são recomendadas para cada situação particular de ferrovia e são relacionadas abaixo de acordo com a Figura 141. (MAGEL, SROBA, SAWLEY, & KALOUSEK, 2007)

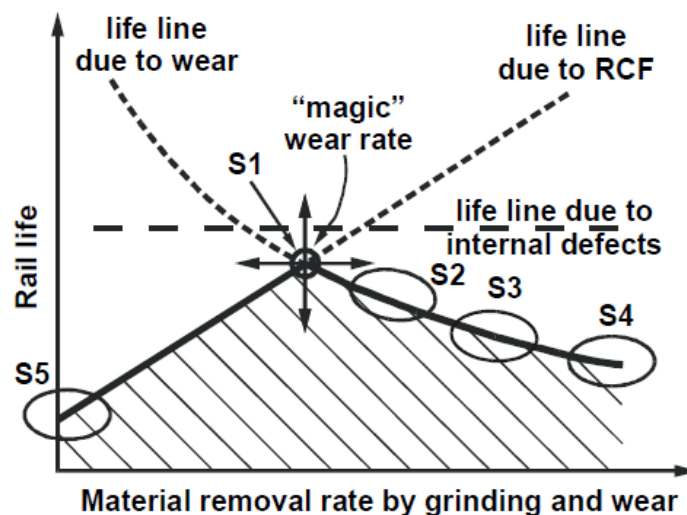


Figura 141: Magic Wear Rate.

- Estratégia S1: é a condição onde o RCF é controlado pela remoção frequente e suficiente de material por esmerilhamento e complementar desgaste, ou seja, a Taxa Mágica de Desgaste. A experiência com esmerilhamento Preventivo mostra que a espessura a ser retirada do topo do trilho é de 0,002" a 0,003" (0,051 a 0,076 mm) e do canto de bitola gira em torno de 0,15 mm do trilho externo e do lado de campo do trilho interno a cada 15 a 30 MGT. Após um passo simples de esmerilhamento na velocidade de 12 a 16 km/h é obtido um perfil de trilho correto. Como uma pequena quantidade de material é removida, a superfície remanescente permanece endurecida (*work hardened*) com uma tensão residual favorável de compressão que inibe mais ainda o aparecimento de deformação e início das trincas. As curvas apertadas são mais frequentemente esmerilhadas que as curvas suaves e os trilhos de tangente menos ainda. Esta estratégia é adequada para corrigir o esmerilhamento de um trilho recém instalado ou para um trilho onde foi usada as estratégia S2-S4.

- Estratégia S2: representa o processo de esmerilhamento Preventivo-Gradual. A esmerilhadora trabalha num velocidade menor, aumentando a amperagem do motor de esmerilhamento, otimizando os padrões de esmerilhamento de trilho e diminuindo o intervalo de esmerilhamento, a quantidade de metal removido em cada ciclo pode ser aumentada. Esta estratégia é aplicada para atender aos trilhos com trincas preexistentes ou perfis ruins. Usualmente um intervalo de esmerilhamento preventivo de 15 a 20 MGT é usado. Uma vez obtida à limpeza da superfície do trilho dos danos de RCF e restaurada a forma dos perfis a estratégia S1 deve ser o alvo.
- Estratégia S3: é a prática de esmerilhamento de manutenção com longos intervalos de esmerilhamento e maior remoção de material, usando múltiplos passes em baixa velocidade (usualmente 2 ou 3) em algumas curvas. O trilho onde o esmerilhamento é feito com um único passe, a velocidade usualmente utilizada é de 6 a 10 km/h. Embora esta estratégia previna severos RCF, ela diminui a vida do trilho.
- Estratégia S4: é o caso do esmerilhamento Corretivo onde o trilho se encontra num estágio avançado de avaria devido ao RCF. A frequência de esmerilhamento é baseada em outros fatores ou limitações do que MGT; e é tipicamente muito mais longa que as usadas nas estratégias S1-S3. Somente vias com visíveis RCF são tratadas. Uma grande quantidade de material é retirada do boleto do trilho. Isto é realizado através de muitos passes em baixa velocidade (3 a 7) especialmente em curvas. A remoção de camadas endurecidas (*work hardened*) do trilho conduz a altas taxas iniciais de deformação plástica, rápida deterioração dos perfis dos trilhos e acelerado crescimento de RCF que diminui mais ainda a vida do trilho.
- Estratégia S5: Filosofia sem esmerilhamento. Somente o desgaste ocorre no contato roda-trilho. O trilho eventualmente falha, algumas vezes rapidamente devido a RCF. Trilhos *premium* em condições sem lubrificação tem resistido a várias MGT sem esmerilhamento, porém a vida útil será uma fração do que poderia ser atingida com a prática de manutenção regular.

O esmerilhamento preventivo de trilhos em combinação com trilhos de melhor metalurgia, trilhos premium, tem contribuído para duplicar a vida útil do trilho ao desgaste e quadruplicar a vida útil do trilho a fadiga nos últimos 25 anos. (MAGEL E. , 2011)

Lubrificação e Esmerilhamento

Trincas de fadiga na superfície do trilho crescem rapidamente quando contaminada com água e um pouco menos quando contaminada com uma mistura de água e lubrificante. Por outro lado, a lubrificação reduz substancialmente a tensão de tração na superfície roda-trilho e por isso reduz o número de ciclos do contato que contribui para a fadiga. Por esta razão, esmerilhamento preventivo (o qual as trincas na superfície são eliminadas) em combinação com lubrificação pode aumentar significativamente a vida do trilho. Reciprocamente, a aplicação de lubrificantes em trilhos com defeitos RCF pode aumentar a taxa de crescimento das trincas. Desde que a lubrificação também elimina o desgaste na face de bitola do trilho externo e controla a força lateral em curvas, um efetivo programa de lubrificação é essencial para o sucesso do esmerilhamento preventivo assim como para maximizar a vida útil dos trilhos. (IHHA, 2001)

Controle do atrito no topo e Esmerilhamento

Como o uso da tecnologia de controle do atrito no topo do trilho consegue minimizar a propagação das trincas já existentes e inibir o aparecimento de novas trincas, a aplicação em conjunto com o esmerilhamento aumenta a vida útil dos trilhos.

Quando o desgaste é inibido, o mecanismo de falha predominante será a fadiga. Sendo assim o esmerilhamento tem fundamental importância, pois a superfície do trilho necessita de um desgaste mínimo para eliminar as micro-trincas provenientes da solicitação do material.

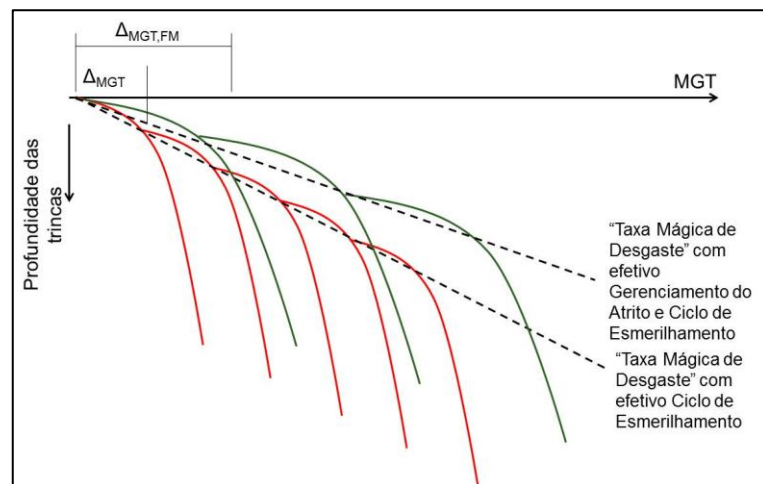


Figura 142: Taxa Mágica do desgaste com efetivo Gerenciamento do Atrito e Ciclo de Esmerilhamento.

A Figura 142 ilustra a taxa mágica de desgaste com o ciclo de esmerilhamento e com o uso das duas tecnologias, é evidente o aumento da vida útil dos trilhos baseado no aumento do ciclo de esmerilhamento e a diminuição da taxa de propagação das trincas.

Capítulo 6 - Conclusão

O controle do atrito é fundamental para uma ferrovia preocupada em minimizar custos. O desgaste de trilhos e rodas, assim como o consumo de combustível são os maiores itens de custos da maioria das ferrovias. Qualquer iniciativa envolvendo estes fatores de custos merece elevada relevância.

Diversos trabalhos envolvendo gerenciamento do atrito têm sido publicados, resultados positivos e sistemáticos foram obtidos na CP Rail. (RONEY, EADIE, OLDKNOW, SROBA, CALDWELL, & SANTORO, 2009)

Os principais defeitos que ocorrem nos trilhos, tais como Desgaste, Fadiga de Contato (RFC), Corrugação, estão diretamente relacionados ao parâmetro físico constituído pelo coeficiente de atrito, portanto conhecer sua atuação e os níveis desejáveis de sua magnitude é fator crucial para garantir a eficiência operacional.

A sinergia entre gerenciamento do atrito, esmerilhamento de trilhos, manutenção dos perfis adequados e metalurgia de trilhos e rodas é evidente. A partir do momento que o desgaste é minimizado ou suprimido, os defeitos de fadiga irão aparecer. O emprego do esmerilhamento para o controle das trincas de RFC e a utilização de trilhos de alta resistência juntamente com o gerenciamento do atrito são as três chaves para o aumento nunca antes previsto na vida útil dos trilhos nas décadas passadas.

Os melhores resultados na aplicação do gerenciamento do atrito foram alcançados com o emprego da lubrificação da face de bitola e controle do atrito no topo do trilho, porém o uso de um ou de outro está diretamente associado à tonelagem anual transportada e a topologia da linha.

Pelos trabalhos técnicos divulgados em congressos internacionais consta-se que a partir da segunda metade da década passada as mais eficientes ferrovias internacionais passaram a considerar o gerenciamento do atrito e esmerilhamento de trilho (reperfilamento da geometria do contato roda-trilho) como atividades essenciais e críticos na manutenção.

O conhecimento dos fundamentos do gerenciamento do atrito constitui uma etapa importante e essencial para o domínio e gestão de um dos mais importantes ativos da atividade ferroviária moderna, o trilho.

6.1. Resultados do emprego do Gerenciamento do Atrito

Union Pacific Railroad – Ferrovia Heavy Haul - EUA

Os resultados da implantação de seis aplicadores TOR ao longo de uma linha principal da ferrovia Union Pacific demonstram uma significativa redução na força lateral e na taxa de desgaste do trilho interno. Os dados coletados indicam que o desempenho da força lateral é significamente pela

operação de trens. Trens trafegando no sentido ascendente alcançaram uma redução nas forças laterais de 31% a 58% com os aplicadores TOR ativados (Figura 143). Trens trafegando no sentido descendente com o freio pneumático aplicado alcançaram uma redução menor, 0-18% nas mesmas condições de aplicação do TOR. (REIFF, MAKOWSKY, & GEARHART, Implementation Demonstration of Wayside Based TOR Friction Control Union Pacific Railroad - Walong, CA, 2005)

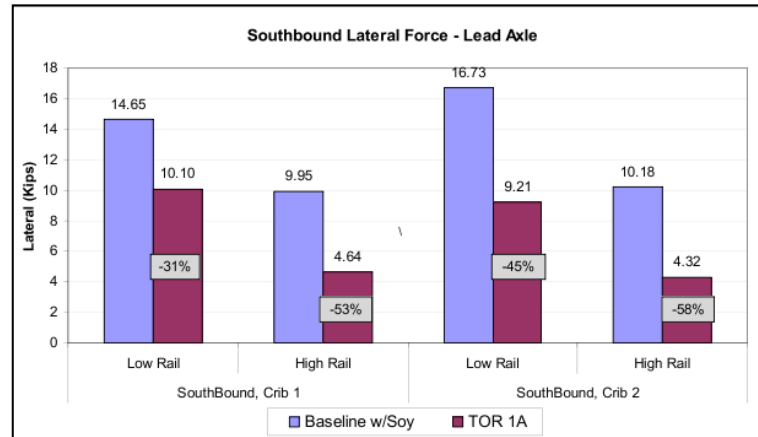


Figura 143: Redução da força lateral na ferrovia UP. (REIFF, MAKOWSKY, & GEARHART, Implementation Demonstration of Wayside Based TOR Friction Control Union Pacific Railroad - Walong, CA, 2005)

A redução da taxa do desgaste dos trilhos obtida variou de 23% até 60%. Inspeções visuais mostraram que o local do teste apresentou menos trincas na superfície do trilho depois de 140 MGT em áreas onde houve aplicação TOR em relação a áreas com apenas lubrificação face de bitola. (REIFF, Top-of-Rail Friction Control on Rail Surface Performance and Gridding, 2007)

Canadian Pacific Railway – Ferrovia Heavy Haul – Canadá e EUA

Em média, o programa “100% Effective Friction Management” teve uma significativa redução de 50% na taxa de desgaste vertical do trilho externo, 57% na taxa de desgaste vertical do trilho interno. O desgaste da face de bitola foi eliminado como era esperado no programa. (SROBA, OLDKNOW, DASHKO, & RONEY, 2005)

Entre os ciclos de esmerilhamento a condição da superfície dos trilhos é limpa, ou seja, livre de defeitos superficiais. O ciclo de esmerilhamento é em torno de 40 MGT. Não houve problemas de tração ou frenagem na subdivisão de Thompson onde o programa foi introduzido. (SROBA, OLDKNOW, DASHKO, & RONEY, 2005)

A redução da força lateral (Figura 144) em média foi de 42%. (SROBA, OLDKNOW, DASHKO, & RONEY, 2005)

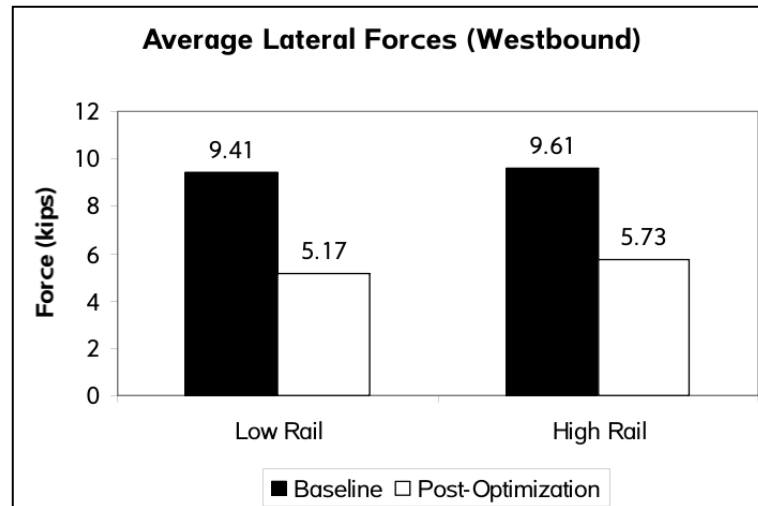


Figura 144: Redução média da força lateral na CPRail.

A CP estima a economia de combustível conservadoramente entre 1,4% e 3,3% para oito subdivisões do corredor oeste e a rota de carvão, onde foram instalados aplicadores TOR ao lado da via a cada 4,5 quilômetros (Figura 145). O custo de CAD 0,70 por litro de diesel, o incremento da economia de combustível devido ao gerenciamento do atrito, juntamente com uma eficiente lubrificação da face de bitola, resultará num economia de 6 milhões de dólares canadenses. (RONEY, EADIE, OLDKNOW, SROBA, CALDWELL, & SANTORO, 2009)

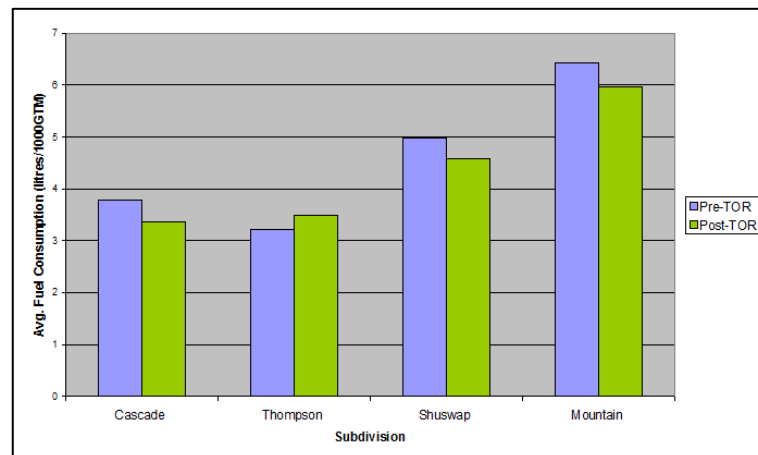


Figura 145: Economia de combustível mensurada na CP Rail com emprego do Gerenciamento do Atrito.

Canadian National – Ferrovia Heavy Haul – Canadá

Apesar da meta de redução de força lateral de 30% para o posicionamento e configuração dos equipamentos, a redução da força lateral foi um pouco maior (Figura 146).

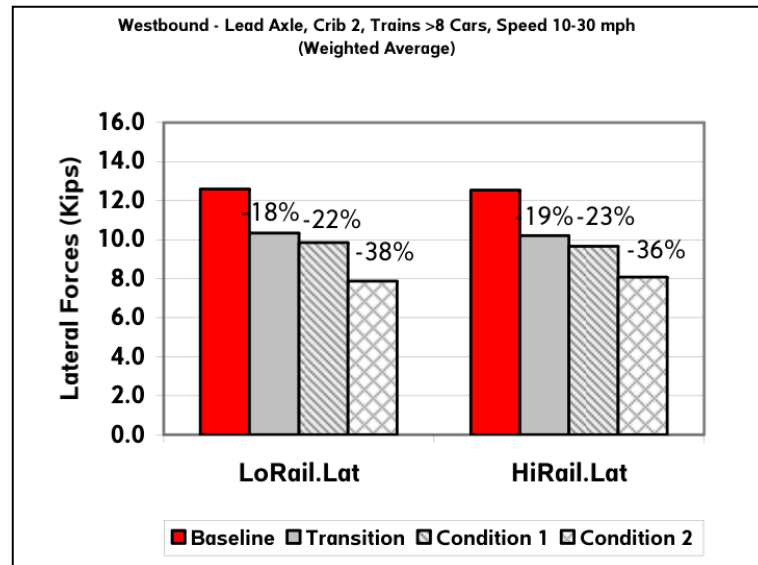


Figura 146: Redução de força lateral na CN.

A taxa de desgaste do trilho com a aplicação do gerenciamento do atrito quando comparado com a condição seca foi reduzida entre 30-40% no topo do trilho interno e na face de bitola do trilho externo.

Shouhaung Railway (SHR) – Ferrovia Heavy Haul – China (EADIE D., et al., 2011)

SHR é uma das maiores ferrovias de carga da China, possui 590 km de linhas entre Shenchí e Huanghua.

Significantes aumentos na tonelagem anual transportada na SHR tem gerado um acelerado desgaste de trilho e crescimento de RCF problemas em muitas curvas apertadas. Para resolver os problemas dos trilhos, um teste de campo foi estabelecido na subdivisão Yuanping para avaliar a efetividade do Gerenciamento do Atrito.

A média de desgaste de trilho (Figura 147) calculada para desgaste lateral nos trilhos externos e desgaste vertical nos trilhos internos foram 50% menores se comparadas com a condição seca. A área onde o Gerenciamento do Atrito foi implantado dobrou a vida útil do trilho.

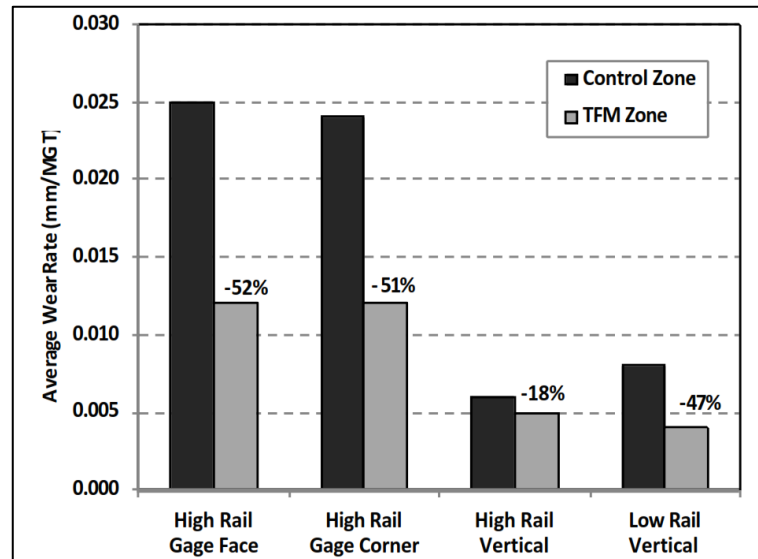


Figura 147: Comparação da taxa média de desgaste (mm/MGT) entre a zona controlada sem Gerenciamento do Atrito e a zona com Gerenciamento do Atrito. As porcentagens com a redução da taxa de desgaste estão listadas acima das respectivas colunas.

A relação L/V no trilho externo e interno no rodeiro guia reduziu de 59-69% e 19-23% em locomotivas C64/C70 e vagões respectivamente conforme Tabela 10. Estes resultados sugerem um aumento na segurança operacional para SHR através da redução do risco de descarrilamento por subida de roda (wheel climb).

Type	LF – High Rail (kN)	LF- Low Rail (kN)	L/V – High Rail	L/V – Low Rail
C64 Loco	-65%	-60%	-65%	-59%
C64 Car	-26%	-22%	-23%	-22%
C70 Loco	-69%	-61%	-69%	-61%
C70 Car	-20%	-22%	-23%	-19%

Tabela 10: Comparação entre redução de força lateral e relação L/V.

MRS Logística – Ferrovia Heavy Haul – Brasil (JORGE, RODRIGUES, VIDON, VIDON, CALDWELL, & SROBA, 2009)

A MRS Logística é pioneira na implantação do Gerenciamento do Atrito no Brasil. Em 2007 o projeto foi iniciado com a colaboração entre a MRS, o NRC-CSTT, LB Foster Friction Management e CH.Vidon para avaliar os benefícios da otimização do gerenciamento do atrito e estabelecer os impactos da instalação de um trecho teste. Em 2011 o projeto foi expandido com implantação de equipamentos em larga escala. O projeto envolve a instalação de 75 lubrificadores face de bitola e 77 aplicadores de modificador de atrito no topo do trilho com objetivo final de proteger 515 km da malha ferroviária da MRS.

Os resultados dos testes iniciais realizados em 2007 e 2008 são apresentados na figura 133. As maiores forças laterais ocorreram no trilho interno da curva onde o sistema L/V estava instalado. Na Figura 133 no lado esquerdo referente ao trilho interno, a condição seca (a azul) produziu o maior gama de forças laterais, bem como as magnitudes mais elevadas de força. A lubrificação face de

bitola (em magenta) reduziu a escala de força, e reduziu as magnitudes das forças de pico consideravelmente. A introdução do TOR causou uma maior redução da gama de força lateral.

A Figura 148 lado esquerdo mostra as forças laterais sobre o trilho externo da curva onde o sistema L/V estava instalado. Pode ser visto que a utilização de lubrificação da face de bitola deslocou a distribuição de forças laterais para magnitudes mais elevadas, e este foi resultado esperado. A introdução do TOR reduziu as forças laterais.

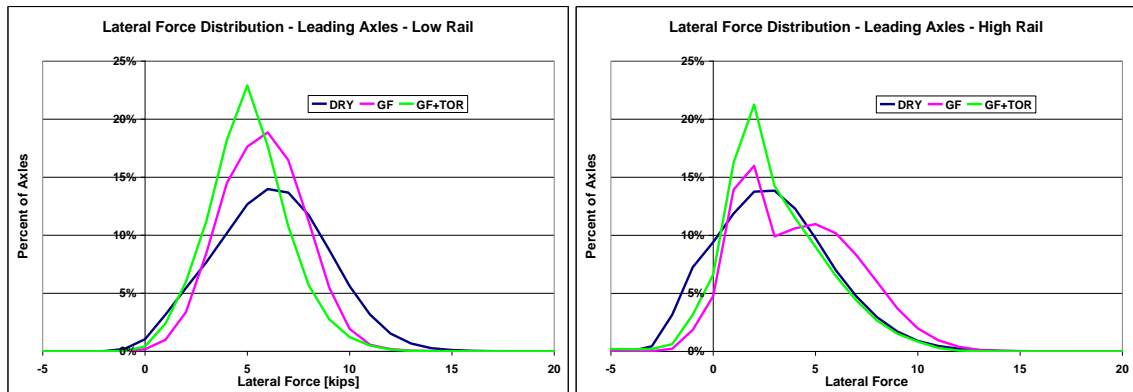


Figura 148: Distribuição de forças laterais nos testes da MRS Logística.

A Figura 149 a esquerda mostra a diminuição da taxa de desgaste do trilho para cada faixa de curvatura (redução entre 51% e 77%) com a maior melhoria nas curvas mais acentuadas. A Figura 149 a direita mostra a diminuição da taxa de desgaste vertical para cada faixa de curvatura (redução entre 46% e 68%) com a maior melhoria também nas curvas mais acentuadas.

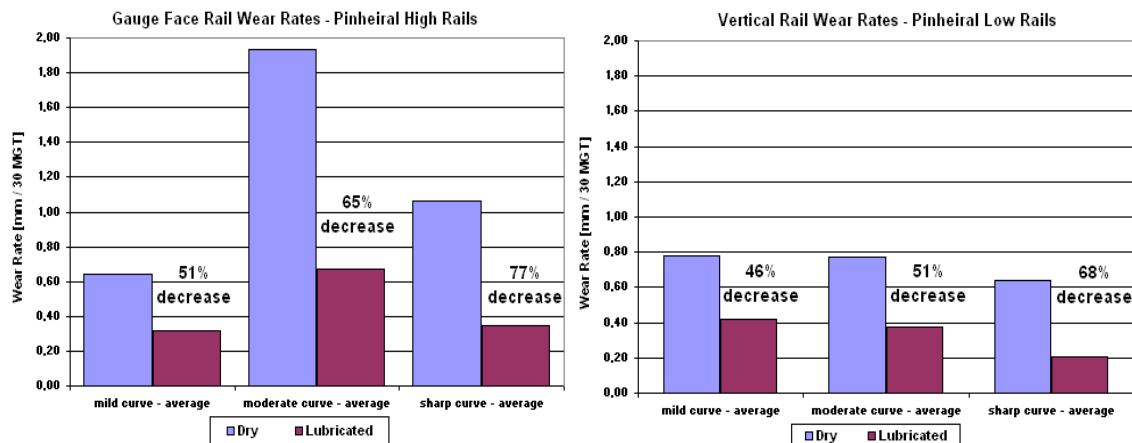


Figura 149: Taxas de desgaste dos trilhos no zona de teste em Pinheiral.

Heathrow Express (HEX) – Metrô de Londres (CHESTNEY, DADKAH, & EADIE, 2009)

HEX opera um serviço de transporte do centro de Londres ao Aeroporto Heathrow. Nos últimos anos um número de problemas relatados a interface roda-trilho tornaram-se frequente, particularmente na via nas proximidades do aeroporto. Estes problemas eram grande número de quebra de grampos de fixação, corrugação, desgaste diferencial entre as rodas e RCF. A lubrificação da face de bitola ao lado da via é usada no sistema.

HEX decidiu avaliar a tecnologia de aplicação TOR, para melhorar o gerenciamento da interface roda-trilho.

Os resultados demonstraram uma redução na força lateral maior que 50% (Figura 150).

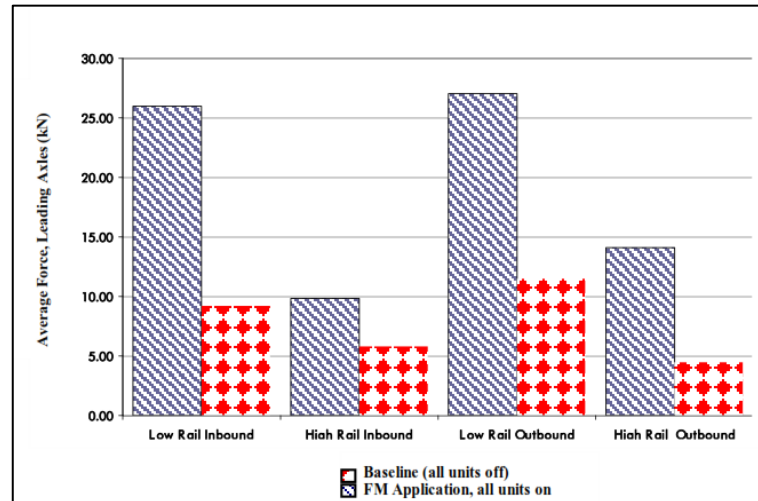


Figura 150: Média de força lateral no rodeiro guia com e sem aplicação de TOR.

A quebra de grampos foi reduzida devido à aplicação de modificador de atrito. Isto é muito provável devido à redução das falhas de fadiga causadas pela excessiva deflexão do patim do trilho. As deflexões são devido a altas forças laterais transmitidas pela interface roda-trilho (Figura 151).

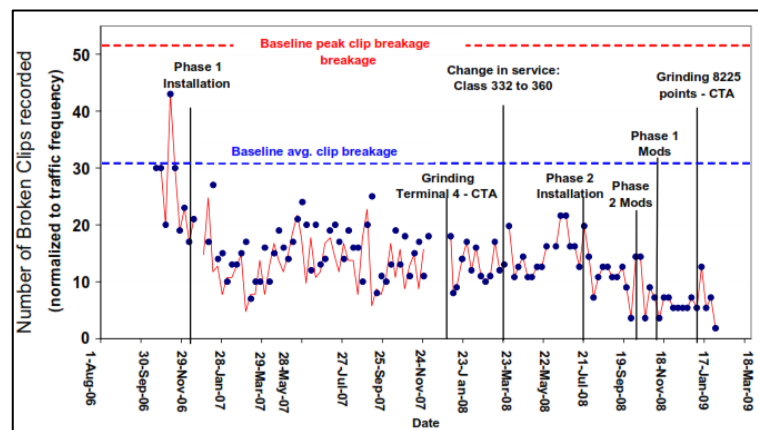


Figura 151: Taxa de quebra de grampos (ajustada pela frequência de tráfego).

A substancial redução na taxa de crescimento da corrugação foi observada. Isto tem permitido ciclo de esmerilhamento maior, tanto em termos de frequência de esmerilhamento como redução do material removido.

O desgaste da pista de rolamento das rodas foi substancialmente reduzido com a aplicação do TOR. Uma similar redução ocorreu na diferença de diâmetros entre as rodas, as rodas começaram a se desgastar mais uniformemente.

A aplicação TOR hoje faz parte das práticas de manutenção do HEX.

KAMOME Express – Trem de alta velocidade - Japão (EADIE, OLDKNOW, OKA, HUI, KLAUSER, & DICK, 2010)

A Kyushu Railway Company opera o “Kamome Express” em velocidades de até 130 km/h em bitola estreita na linha principal de Nagasaki de Hakata até Nagasaki na ilha de Kyushu no Oeste do Japão.

A linha possui um número de curvas apertadas, e o operador estava preocupado com um nível inaceitável de desgaste de flange. Especificamente a linha possui 27 curvas de $R=249\text{m}$, 15 curvas com raios de 291m e 8 curvas raios de 349m. Esta característica faz este estudo de caso bastante interessante para o Sistema Norte Americano de Mais Alta Velocidade tal como a categoria “Sistema Emergente de Alta Velocidade” [3]. O sistema empregou um número limitado de lubrificadores fixos aplicando graxa no canto da bitola do trilho externo, que foi claramente inadequado para o controle do desgaste de roda.

Para resolver o significativo desgaste de flange, um teste de lubrificação do flange com bastão LCF foi desenvolvida e executada a partir de novembro de 2006 até maio de 2007 em dois trens designados de SM-1 e SM-2. A Figura 152 mostra o sistema de configuração com a posição do aplicador de LCF, e a Figura 11 ilustra o equipamento de aplicação. Pode se notar que a percentagem baixa de rodas cobertas com LCF foram inicialmente esperadas não fornecer completa proteção sobre todas as rodas, contudo os resultados indicaram o contrário. Isto pode ser devido aos longos trechos da via em tangente que permitiram o completo reabastecimento dos reservatórios do LCF e isolaram segmentos de curvas apertadas onde a proteção de flange é necessária.

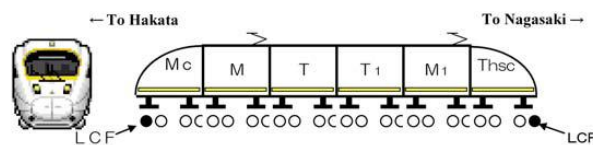


Figura 152: Rodeiros com aplicação de LCF.

As Figura 153 e Figura 154 mostram as taxas de desgaste eixo por eixo para dois testes de trens. Para o teste do trem SM-1 taxas de desgaste do flange foram registradas primeiro como base de referência, depois com o LCF instalado e finalmente com o LCF removido novamente. O exame mostrou que as taxas de desgaste da base de referência foram altas e bastante variáveis, com poucos eixos exibindo não usuais altas taxas de desgaste. A taxa de desgaste do flange foi reduzida consideravelmente nas rodas com aplicação de LCF. A taxa média de desgaste do flange neste trem é reduzida pelo fator de cerca de 3 vezes se comparada com a base de referência. Os desgastes de flange nas rodas com o maior taxas de desgaste na base de referência foram reduzidos pelo menos 6 vezes. A taxa de desgaste de flange depois que o LCF foi removido não foi tão alta quanto as altas taxas da base de referência. A razão provável é que o teste do período da base de referência começou com rodas novas ou retorneadas com desgaste de roda resultando num perfil mais conforme com taxa de desgaste reduzida. Contudo algumas rodas individualmente continuaram a desgastar a uma taxa elevada durante o segundo período da base de referência.

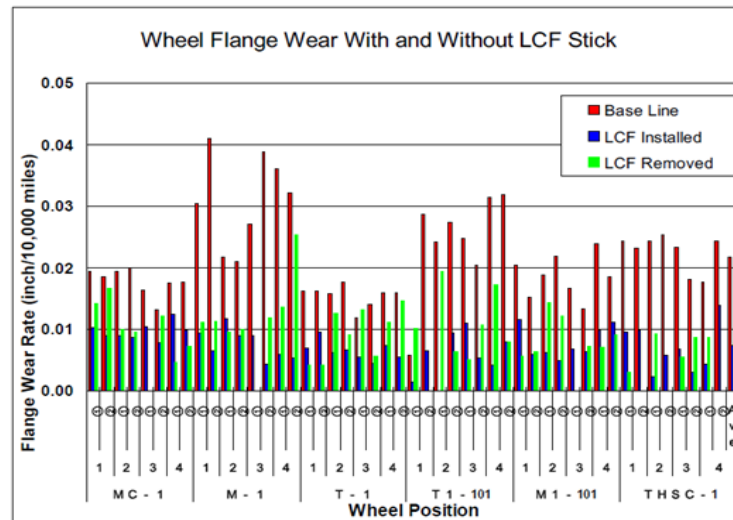


Figura 153: Desgaste do flange sem e com a aplicação do LCF, trem SM-1.

Para o teste do trem SM-2, a tentativa envolveu somente as medições base de referência e depois da instalação do LCF. Neste trem, o desgaste do flange na base de referência foi menos severo e mais uniforme. Com a aplicação do LCF, a taxa de desgaste do flange foi reduzida de um fator 1,8.

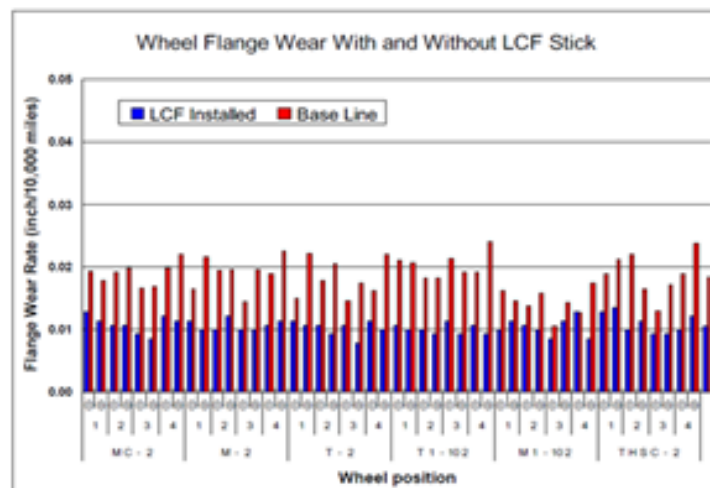


Figura 154: Desgaste do flange sem e com a aplicação do LCF, trem SM-2

O resultado mostra que no “tilting train” questões de desgaste de flange podem ser significativamente reduzidas com aplicação de LCF. Depois deste teste, LCF foi instalado no restante da frota de Kamome.

7. Referências Bibliográficas

- AREMA. (2009). Manual for Railway Engineering.
- BENSON, M. (1993). Effect of differential hardness on wheel/rail wear - literature survey.
- BERTHIER, Y., DESCARTES, S., BUSQUET, M., NICCOLINI, E., DESRAYAUD, C., & BAILLET, L. (Novembro de 2003). The role and effects of the third body in the wheel-rail interaction.
- BOGDANSKI, S., & LEWICKI, P. (2006). 3D Model of Entrapped Liquid in Rolling Contact Fatigue Cracks in Rails. *7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, (pp. 491-498). Brisbane.
- CARMO, R. C., VIDON, F. O., EADIE, D. T., OLDKNOW, K., & LOPES, L. A. (2011). O Gerenciamento do Atrito na MRS Logística. *III Encontro de Ferrovias*.
- CHESTNEY, M., DADKAH, N., & EADIE, D. (2009). The Effect of Top of Rail Friction Control on a European Passenger System: The Heathrow Express Experience.
- Chevron Brasil. (2005). Fundamentos de Lubrificação.
- CLAYTON, P., ALLERY, M. B., & BOLTON, P. J. (1981). Surface Damage of Rails. In: *Proceedings of a seminar Rail Technology* (pp. 179-192).
- CONN, K. (2010). For Sale - TOR/ATW FM. *Wheel Rail Interaction Conference*. Chicago.
- COTTER, J., EADIE, D., ELVIDGE, D., & OLDKNOW, K. (s.d.). Incorporation or Remote Monitoring Technology on a train mounted top of rail friction control dispensing system.
- COTTER, J., EADIE, D., ELVIDGE, D., HOOPER, N., ROBERTS, J., MAKOWSKY, T., et al. (2005). Top of Rail Friction Control: Reductions in Fuel and Greenhouse Gas Emissions.
- DEROCHE, R. Y., BETTEMBOURG, J. P., & PRASIL, B. B. (s.d.). RFC cracks on SNCF conventional tracks. In: J. J. KALKER, *Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation* (pp. 435-448).
- EADIE, D. (Maio de 2010). Lubrication and Friction Management.
- EADIE, D. (2012). A Review of Locomotive Fuel Savings with TOR-FM: Connecting theory and field results. *Wheel Rail Interface Seminar*. Chicago.
- EADIE, D. T., & KALOUSEK, J. (2001). Spray it on, let 'em roll. *Railway AGE*.
- EADIE, D. T., BOVEY, E., & KALOUSEK, J. (Novembro de 2002). The role of friction Control in Effective Management of the wheel/rail interface. *The Railway Technology Conference at Railtex*.
- EADIE, D. T., ELVIDGE, D., OLDKNOW, K., STOCK, R., POINTNER, P., KALOUSEK, J., et al. (2006). The Effects of Top of Rail Friction Modifier on Wear and Rolling Contact Fatigue: Full Scale Rail-Wheel Test Rig Evaluation, Analysis and Modelling.

- EADIE, D. T., LU, X., SANTORO, M., & OLDKNOW, K. (2011). Wayside Gauge Face Lubrication: How much do we really understand? *IHHA*.
- EADIE, D. T., MAGLALANG, L., VIDLER, B., LILLE, D., & REIFF, R. (2005). Trackside Top of Rail Friction Control at CN.
- EADIE, D. T., SANTORO, M., OLDKNOW, K., & OKA, Y. (2006). Field Studies of the Effect of Friction Modifiers on Short Pitch Corrugation Generation.
- EADIE, D. T., VIDLER, B., HOOPER, N. E., & MAKOWSKY, T. W. (2003). Top of Rail Friction Control: Lateral Force and Rail Wear Reduction In A Freight Application. *IHHA*.
- EADIE, D., LU, X., MAKOWSKY, T., OLDKNOW, K., XUE, J., JIA, J., et al. (2011). Friction Management on a Chinese Heavy Haul Coal Line. *IHHA*. Calgary.
- EADIE, D., OLDKNOW, K., OKA, Y., HUI, R., KLAUSER, P., & DICK, M. (2010). Effective Friction Control for Optimization of High Speed Rail Operations. *Joint Rail Conference*. Urbana. IL.
- EADIE, D., SANTORO, M., & POWELL, W. (2001). Wheel Squeal control with Keltrack liquid friction modifier and protector trackside application: theory and practice. *MEProceedings of 2001 IMechE Congress*.
- EADIE, D. T., KALOUSEK, J., & CHIDDICKI, K. C. (2000). The role of High Positive Friction (HPF) Modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena. *Contact Mechanics*. Tóquio.
- EPP, K. J., & MUTTON, P. J. (2002). Wheel/Rail Interaction: Current "State of the Art" in the Australasian Railway Industry. *Conference on Railway Engineering*. Wollongong.
- ESVELD, C. (2001). *Modern Railway Track*. Delf University of Tecnology.
- Fassarella, L., & Rajkumar, B. e. (1999). Wheel/Rail Life Optimization with the Implementation of Increased Axle Loads on Carajas Railway, Brazil. *IHHA*.
- FROHLING, R., KOKER, J., & AMADE, M. (2007). Rail Lubrication and its Impact on the Wheel/Rail System. *IHHA Specialist Technical Session*.
- GRASSIE, S. L. (1 de March de 2004). Rolling contact fatigue on the British railway system: treatment. *WEAR*.
- GRASSIE, S. L., & KALOUSEK, J. (Junho de 1993). Rolling Contact Fatigue of Rails: Characteristics, Causes and Treatments. *6th International Heavy Haul Conference*.
- GUDINESS, T. (June de 1989). Wheel-Flange-to-Rail Lubrication of Tangent and Curve Track. *Association of American Railroads Research and Test Department - Report nº R-729*, pp. 1-2.
- GUINS, T. S. (August de 2005). Economic Analysis of Top of Rail Friction Control - Walong, CA. *Technology Digest*.

- IHHA. (2001). *Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues*. Virginia.
- IHHA. (2009). *Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations - Infrastructure Construction and Maintenance Issues*.
- JORGE, C., RODRIGUES, C., VIDON, W., VIDON, F., CALDWELL, R., & SROBA, P. (2009). Implementing 100% Effective Gauge-face lubrication and TOR Friction Management strategies on MRS Heavy Haul Railroad. *IHHA*.
- KALOUSEK, J. (1975). *Track/Train Dynamics Report #4 Rail Corrugations*.
- KALOUSEK, J. (1986). *Wear and Contact Fatigue Model for Railway Rail*.
- KALOUSEK, J. (1997). Modifying and Managing Friction. *Surface Transportation Technology*.
- KALOUSEK, J., & GRASSIE, S. L. (1993). "Rail corrugation: Characteristics, Causes and Treatments. *Journal Rail Rapid Transit; Proceedings of Inst. Mech. Eng. 207F*, pp. 57-68.
- KALOUSEK, J., & KLEIN, R. (1976). Investigation into Causes of Rail Corrugations. *Bulletin n° 656*, pp. 429-448.
- KALOUSEK, J., & MAGEL, E. (1997). The " Magic" wear rate. *Railway Track & Structures*, 3-4.
- KING, F., & KALOUSEK, J. (July de 1976). Rail Wear and Corrugation Studies. *AREA - Bulletin n° 658 - Proceeding Vol. 77*, pp. 601-620.
- LAUFER, E., GHONEM, H., KALOUSEK, J., & STONE, D. (1982). Aspects of Plastic Deformation and Fatigue Damage in Pearlitic Rail Steel. *2nd International Heavy Haul Railway Conference*. Colorado Springs.
- LEWIS, R., & U., O. (2009). *Wheel-rail interface handbook*. CRC Press.
- MAGEL, E. (2011). *Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review*. Federal Railroad Administration.
- MAGEL, E. E. (2005). *Contact Mechanics and Tribology*.
- MAGEL, E., KALOUSEK, J., & CALDWELL, R. (2004). A numerical simulation of wheel wear. *WEAR*, pp. 1245-1254.
- MAGEL, E., SAWLEY, K., SROBA, P., & KALOUSEK, J. (2005). A Practical Approach to Controlling Rolling Contact Fatigue in Railways. *IHHA*.
- MAGEL, E., SROBA, P., SAWLEY, K., & KALOUSEK, J. (10 de 09 de 2007). Control of Rolling Contact Fatigue of Rails.
- MARICH, S. (2005). Major Advances In Rail Technologies Achieved in the Past 10-20 years.
- OLDKNOW, K. (2012). Controlling friction delivers longer rail life. *Railway Gazette International*, 53-55.

- OLDKNOW, K. D., REIFF, R. P., VIDLER, B., & ELVIDGE, D. (2007). Verifying Top of Rail Friction Control through Dynamic Rail Deflection Monitoring.
- OLDKNOW, K., & EADIE, D. (2010). Top of Rail Friction Control as a means to mitigate damaging lateral loads due to overbalanced operation of heavy axle load freight traffic in shared high speed rail corridors. *Joint Rail Conference*. Urbana, IL.
- POLACH, O. (Setembro de 2010). Wheel profile design for target conicity and wide tread wear spreading. *WEAR*.
- Rail Safety & Standards Board. (2006). Management and Understanding of Rolling Contact Fatigue.
- RailCorp. (2009). *Rail Defect Handbook*.
- RailCorp. (2009). *TMC 227 - Surface Defects in Rails*.
- REIFF, R. (2005). *Implementing Top of Rail Friction Control North America Freight Railroad Experience*.
- REIFF, R. (November de 2007). Top-of-Rail Friction Control on Rail Surface Performance and Grinding. *Technology Digest*.
- REIFF, R. (June de 2007). Wayside-Based Top of Rail Friction Control: 95 MGT Update. *Technology Digest*.
- REIFF, R. (2008). Mobile-based car mounted top of rail friction control application issues - Effectiveness and Deployment. *Technology Digest*.
- REIFF, R., MAKOWSKY, T., & GEARHART, M. (July de 2005). Implementation Demonstration of Wayside Based TOR Friction Control Union Pacific Railroad - Walong, CA. *Technology Digest*.
- RONEY, M., BELL, S., PARADISE, S., OLDKNOW, K., & IGWEMEZIE, J. (2011). Implementation of distributed power and friction control to minimize the stress state and maximize velocity in Canadian Pacific's heavy haul/ heavy grade train operations. *IHHA*. Calgary.
- RONEY, M., EADIE, D. E., OLDKNOW, K., SROBA, P., CALDWELL, R., & SANTORO, M. (2009). Total Friction Management on Canadian Pacific. *IHHA*.
- SAMUELS, J., & KALAY, S. I. (2003). Reducing the Stress State of North American Railroads. *IHHA*.
- SAMUELS, J., KALAY, S., & ILER, D. (2003). Reducing the stress state of North American Railroads. *Specialist Technical Session IHHA*.
- SANTORO, M. (Maio de 2004). Rail Corrugation Study.
- SHEN, G., KAPOOR, A., LU, K., & XU, L. (2009). Dynamic effects, rail corrugations and shakedown limits. *IHHA*.
- SILVA, F. C., VIDON, W., RIPPETH, D., & CALDWELL, R. (2005). Preventive-Gradual On-Cycle Grinding:A First for MRS in Brazil.

- Society of Tribologists and Lubrication Engineers. (s.d.). *Society of Tribologists and Lubrication Engineers*. Fonte: <http://www.stle.org>
- SROBA, P. (2012). *Rail Grinding - Presentation to VALE*.
- SROBA, P., OLDKNOW, K., DASHKO, R., & RONEY, M. (2005). Canadian Pacific Railway 100% Friction Management Strategy. *IHHA*.
- SROBA, P., RONEY, M., DASHKO, R., & MAGEL, E. (Setembro de 2001). Canadian Pacific Railway's 100% Effective Lubrication Initiative.
- SROBA, P., RONEY, M., MAGEL, E., & KALOUSEK, J. (2007). The Evolution of Rail Grinding on Canadian Pacific Railway to Address Deep Seated Shells in 100% Effective Lubrication Territories.
- STEELE, R. K., & REIFF, R. P. (1981). Rail: Its behavior and relationship to total system wear. p. 147.
- STOCK, R., & OLDKNOW, K. (2010). Influences of Rail Grades and Topo of Rail Friction Control on Rolling Contact Fatigue. *Wheel Rail Interface Seminar*. Chicago.
- STOCK, R., EADIE, D. T., ELVIDGE, D., & OLDKNOW, K. (2009). Influencing rolling contact fatigue through top of rail friction modifier application - a full scale wheel-rail test rig study.
- TOURNAY, H. M., & MULDER, J. M. (1995). The Transition from wear to stress regime. *WEAR*, pp. 107-112.
- TUNNA, J., SINCLAIR, J., & PEREZ, J. (13 de March de 2006). A review of wheel wear and rolling contact fatigue. pp. 271-289.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1999). *Lubricants and Hydraulic Fluids*.
- VANDERMAREL, J., IWNICKI, S., KLAUSER, P., OLDKNOW, K., EADIE, D., & KENNEDY, W. (s.d.). Energy Savings from Top of Rail Friction Control on Heavy Haul Freight Operations.
- ZAREMBSKI, A. M. (2011). Managing the wheel/rail interface with Grinding. *Railway Track & Structures*, 37-40.

