Universidade de São Paulo

Escola Politécnica

Luiz Henrique Dias Alves

**Mecanismos de Desgaste de
Rodas Ferroviárias**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo,
para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2000

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica

Luiz Henrique Dias Alves

**Mecanismos de Desgaste de
Rodas Ferroviárias**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo,
para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Amilton Sinatora

São Paulo

2000

À MINHA ESPOSA EDNA

AOS MEUS FILHOS LUIZ HENRIQUE, MELINA E ARTHUR

AOS MEUS PAIS JOSÉ MARIA E MARIA HELENA

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Doutor Amilton Sinatora pela amizade, orientação e estímulo à realização deste trabalho. Pessoas como Amilton fazem realmente este mundo melhor.

Ao Prof. Doutor Deniol Katsuki Tanaka pela orientação e colaboração para a realização deste trabalho.

À AMSTED MAXION Fundação e Equipamentos Ferroviários S.A. pelo total apoio à realização e conclusão deste trabalho.

Ao Engenheiro José Antônio Rodrigues Correia pelo incentivo e apoio.

Aos Engenheiros José Gaudencio Machado Padovani e Paulo Henrique Mattosinho pelo apoio e pelas proveitosas discussões sobre rodas ferroviárias.

Ao Prof. Doutor Sérgio Inácio Ferreira, grande amigo, pela valiosa colaboração na realização deste trabalho.

Ao Prof. Doutor Paulo Roberto Mei e ao Prof. Doutor Ivan Falleiros pela colaboração nas discussões sobre a pesquisa.

Ao Engenheiro Oberlan Moreira Calçada pelo importante apoio e orientação.

Aos Engenheiro Adail Barros Filho e Ricardo Schmit Martins pelo apoio e proveitosas discussões sobre desgaste de rodas.

À Divisão de Tecnologia de Transportes do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo pelo suporte técnico e apoio à realização deste trabalho.

À Equipe da Oficina de Vagões Companhia Vale do Rio Doce, Estrada de Ferro Carajás, pelo valioso apoio.

À Equipe da Oficina de Vagões da MBR - Minerações Brasileiras Reunidas S.A. pelo valioso apoio.

Aos colegas Márcio Matos que me apoiou no desenvolvimento e acompanhamento dos testes e Maria Cristina Moré pela orientação e revisão do trabalho.

Aos integrantes do Laboratório de Fenômenos de Superfície pelo apoio recebido.

Aos colegas Evandro Sampaio Ferreira, Ana Carolina Satim, Danilo Cezar Farias e todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão deste trabalho.

LISTA DE ABREVIações

AAR – Association of American Railroads

Al – Alongamento

ASTM – American Society for Testing Materials

BHN - Brinell Hardness Number

CD 38 – Roda de Múltipla Vida de 965,2 mm (38”)

CK 36 – Roda de Múltipla Vida de 914,4 mm (36”)

CVRD – Companhia Vale do Rio Doce

EFC – Estrada de Ferro Carajás

EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

GDT – Vagão Gôndola para descarga em Car -Damper, bitola de 1.6 m, manga de eixo de 165,1 x 304,8 mm (6.5” x 12”) e peso bruto de 119 toneladas

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

HV – Dureza Vickers

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo

LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica

LE – Limite de Escoamento

LFS – Laboratórios de Fenômenos da Superfície

LR – Limite de Resistência

MBR - Minerações Brasileiras Reunidas S. A

MPa – Mega Pascal

MRS – MRS Logística S.A

MW – Roda Múltipla Vida

RA – Estricção

UIC – Union International Railways

LISTA DE SÍMBOLOS

k - Coeficiente de desgaste

γ_f - Coeficiente de ductilidade à fadiga por cisalhamento

P_o - Tensão de contato

K_o - Tensão de cisalhamento do material

μ - Coeficiente de atrito

T - Força tangencial

W - Carga normal

P - Potência térmica

α - Fração total de calor escoada para dentro da roda

mg - Carga

u - Velocidade

E - Energia térmica

Δt - Unidade de tempo

M - Número de partículas de desgaste formadas por unidade de volume

ΔV - Unidade de volume

δ - Coeficiente de formação de partícula de desgaste em função das propriedades do material

A₁ - Energia para formação de uma partícula

C₁ - Constante de material

Q - Taxa de Desgaste

H - Dureza

δ - Relação entre distância escorregada e distância rolada

A - Área de contato

E - Módulo de elasticidade

B - Largura transversal do contato

R - Raio

R_t - Raio do trilho

R_R - Raio da roda

ω - Velocidade tangencial

A e B - Constantes

R_1 - Menor raio do corpo 1 no ponto do contato

R'_1 - Maior raio do corpo 1 no ponto de contato

R_2 - Menor Raio do corpo 2 no ponto de contato

R'_2 - Maior raio do corpo 2 no ponto de contato

a – Semi - eixo maior da elipse

b - Semi - eixo menor da elipse

Z_s - Profundidade abaixo da superfície de contato, onde a tensão de cisalhamento é máxima.

σ_{max} - Tensão máxima de compressão no contato.

τ_{max} - Tensão de cisalhamento máxima.

C_σ - Coeficiente de tensão.

C_τ - Coeficiente de cisalhamento.

C_{zs} - Coeficiente referente a profundidade abaixo da superfície de contato onde ocorre a máxima tensão de cisalhamento.

SUMARIO

Lista de tabelas

Lista de figuras

Resumo

“Abstract

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVO DO TRABALHO.....	14
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	15
3.1 Projeto de Rodas	15
3.1.1 Materiais Empregados.....	15
3.1.2 Dimensional	18
3.2 Tipos e Mecanismos de Desgaste em Rodas Ferroviárias.....	21
3.2.1 Desgaste Abrasivo.....	21
3.2.2 Desgaste por deslizamento	22
3.2.2.1 Alterações microestruturais nas rodas devido à temperatura.....	23
3.2.2.2 Escamação ou “Shelling”	28
3.2.2.3 Formação de Calo	34
3.2.2.4 Lascamento ou “Spalling”.....	35
3.2.2.5 Desgaste Oxidativo.....	38
3.2.3 Trincas Térmicas.....	40
3.3 Efeito das variáveis metalúrgicas e escorregamento no comportamento de materiais de rodas	43
3.3.1 Efeitos de variáveis metalúrgicas no desgaste de materiais de rodas	44
3.3.1.1 Efeito da dureza	45
3.3.1.2 Efeito da composição química no desgaste.....	46
3.3.1.3 Efeito da Microestrutura.....	48

3.3.1.3.1	Efeito da Ferrita livre	48
3.3.1.3.2	Espaçamento interlamelar	49
3.3.1.3.3	Comparação entre perlita e outras microestruturas de aços de rodas	50
3.3.2	Efeito do escorregamento “creepage”	51
3.4	Conclusões da Revisão Bibliográfica	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS	55
4.1	Roda Ferroviária Fundida	55
4.1.1	Processo de Fabricação	55
4.1.1.1	Microestruturas Típicas de Rodas Ferroviárias	57
4.2	Amostras para ensaio de desgaste em laboratório	59
4.3	Métodos Experimentais	60
4.3.1	Ensaio de desgaste	60
4.3.1.1	Determinação dos parâmetros do ensaio	61
4.3.1.2	Descrição e equipamentos de ensaio de desgaste	66
4.3.2	Caracterização microestrutural e do desgaste	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1	Ensaio em laboratório com aços AAR classe C modificados com Cromo descritos na Tabela 7	70
5.1.1	Ensaio com 8% de escorregamento	70
5.1.1.1	Perdas de massa e taxas de desgaste	70
5.1.1.2	Mecanismos de desgaste	73
5.1.1.3	Microdureza após o decorrer do ensaio	79
5.1.2	Ensaio com 3% de escorregamento	80
5.1.2.1	Perdas de massa e taxas de desgaste	80
5.1.2.1.1	Comparação entre os resultados obtidos no ensaio com 3% e 8% de escorregamento	83
5.1.2.2	Mecanismos de desgaste	84

5.1.2.2.1	Análise das partículas de desgaste e óxidos geradas no ensaio com 3% de escorregamento	86
5.1.2.2.2	Encruamento.....	90
5.1.2.3	Microdureza	91
5.2	Comparação dos Mecanismos de Desgaste obtidos em ensaio de desgaste com os verificados em rodas em serviço	92
5.2.1	Condições de desgaste normal	94
5.2.2	Escamação ou “Shelling”	95
5.2.3	Lascamento ou “ Spalling”	99
5.3	Desenvolvimento de material objetivando melhor desempenho em serviço.....	105
5.3.1	Ensaio de laboratório	105
5.3.2	Produção de rodas e ensaio em campo	106
5.3.3	Acompanhamento em campo.....	106
5.3.3.1	Comparação entre as taxas obtidas em ensaio de desgaste e as verificadas em campo	111
6	<u>CONCLUSÕES.....</u>	<u>113</u>
	<u>ANEXO I.....</u>	<u>115</u>
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>121</u>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química e recomendações para uso (AAR M-107/M-208 ^[7]) ..	16
Tabela 2 - Composição Química conforme norma UIC ^[8]	16
Tabela 3 - Propriedades mecânicas de aços de roda ensaiados conforme ASTM A 370 - 94 ^[10] a partir de corpos de prova retirados da pista de rolamento da roda, para aços fundidos classe B e C.....	17
Tabela 4 - Dimensões típicas de rodas ferroviárias de maior utilização e as respectivas cargas máximas aplicadas, conforme AAR M 208 ^[7] (Dimensões nominais - mm)	20
Tabela 5 - Sumário dos dos mecanismos de danos microestruturais em aços de rodas devido a combinação de deformação plásticas e temperaturas ^[19]	25
Tabela 6 - Variação do coeficiente de ductilidade à fadiga [γ_f] com a temperatura em ensaios de fadiga por torção para aços AAR classe C ^[25]	27
Tabela 7 - Composição Química dos Materiais Ensaaiados.....	60
Tabela 8 - Resultados da perda de massa para diferentes cargas vs número de ciclos...	71
Tabela 9 - Perda de massa para diferentes números de revoluções para cargas de 294 e 588MPa e escorregamento de 3%	80
Tabela 10 - Espessuras de friso de rodas CK 36 em teste. Aço AAR classe C/ Cr-V...	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Local de retirada de corpos-de-prova para ensaio de tração ^[63]	17
Figura 2. Desenho esquemático do tribossistema roda-trilho-sapata.....	21
Figura 3. Desenho esquemático da abrasão à dois e três corpos ^[16,58]	22
Figura 4. Variação da tensão de escoamento com a temperatura. Aço AAR classe C. Adaptado de GALLAGHER ^[6]	23
Figura 5. Região da pista de rolamento de uma roda típica da Estrada de Ferro Carajás, apresentando intensa deformação plástica ^[37]	26
Figura 6. Estágios para formação de escamação em rodas ^[66]	30
Figura 7. Escamação em trilhos da Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD ^[40]	30
Figura 8. Diagrama de Shakedown ^[31]	31
Figura 9. Possíveis direções da trinca em função da direção do escoamento ^[4]	34
Figura 10. Pista de rolamento de uma roda que sofreu escorregamento travada por frenagem sobre o trilho, com formação de Flats e pequenos calos ^[66]	35
Figura 11. Pista de rolamento de uma roda da EFC-CVRD que sofreu travamento durante a frenagem com escorregamento e posterior lascamento de material ^[17]	36
Figura 12. Estudos realizados por JERGEUS et al ^[35] sobre formação de martensita durante o escorregamento da roda.....	37
Figura 13. Desenho esquemático do modelo utilizado por JERGEUS et al ^[35]	38
Figura 14. Superfície de uma roda que sofreu escorregamento e transformação martensítica, revelada com persulfato de amônia a 20% ^[6]	38
Figura 15. Pista de rolamento de uma roda apresentando trincas térmicas ^[37]	41
Figura 16. Dinamômetro utilizado por GALLAGHER et al ^[44] para estudar mecanismos de falhas em flanges de rodas. Equipamento consiste de dois truques ferroviários montados um contra o outro sendo o superior monitorado e tendo as rodas com seu perfil original. O rodeiro do truque inferior tem sua pista de rolamento usinada conforme perfil do trilho. O sistema representa condições bem próximas às de campo.	42
Figura 17. Posicionamento incorreto de sapata de freio, atuando sobre o flange ^[44]	43

Figura 18. Falha por fadiga que se propagou a partir de trincas térmicas induzidas no flange da roda pelo posicionamento incorreto da sapata na operação de frenagem ^[44]	43
Figura 19. Variação da taxa de desgaste com a dureza de aços de trilhos. Adaptado de CLAYTON ^[39]	45
Figura 20. Variação da taxa de desgaste com a composição química. Adaptado de CLAYTON ^[13]	47
Figura 21. Variação da resistência ao desgaste com a fração volumétrica de ferrita livre na microestrutura de aços perlíticos-ferríticos de rodas. Adaptado de HIRAKAWA ^[9]	49
Figura 22. Ilustração do vazamento de rodas ferroviárias em molde de grafite pelo processo por baixa pressão ^[55]	57
Figura 23. Microestrutura da roda próxima a superfície de rolamento. Presença maciça de bainita. Aumento 1000x. Ataque nital 1%.	58
Figura 24. Microestrutura da roda na região de transição bainita- perlita fina. Aumento 1000x. Ataque nital 1%.	58
Figura 25. Microestrutura predominante da roda. Perlita fina e ferrita alotriomorfa Obtida por microscopia eletrônica de varredura.	59
Figura 26. Local de retirada das amostras para análise química e ensaios de desgaste de rodas (a) e trilhos (b).....	60
Figura 27. Rodeiro instrumentado utilizado para medição de esforços que atuam sobre a roda	62
Figura 28. Elipse de contato medida na EFC - CVRD.	63
Figura 29. Desenho dos corpos-de-prova. (a) 8% escorregamento (b) 3% escorregamento (Dimensões em mm).	65
Figura 30. Máquina AMSLER A135 para ensaio de desgaste.	68
Figura 31. Desenho esquemático do ensaio.....	68
Figura 32. Nanodurômetro de indentação dinâmica do Laboratório de Fenômenos de Superfície da EPUSP.	69
Figura 33. Perda de massa vs. número de revoluções para o material do trilho	71
Figura 34. Perda de massa vs. número de revoluções para o material da roda	71
Figura 35. Perda de massa vs. número de revoluções para o material da rada e trilho.	72

Figura 36. Taxa de desgaste (mg/m) vs. metro para 8% de escorregamento.....	74
Figura 37. Seção longitudinal do corpo de prova ensaiado com carga de 588 MPa, 100.000 rev. - Ataque nital 1%, 200x.....	75
Figura 38. Seção transversal do corpo de prova ensaiado com carga de 588 MPa, 100.000 rev. - Ataque nital 1%, 200x.....	75
Figura 39. Seção transversal do corpo de prova apresentando formação de partículas desgaste. Ataque nital 1%, 200x. (588 MPa, 10^5 rev. e 8% de escorregamento).....	76
Figura 40. Trinca paralela à superfície de desgaste na seção longitudinal do corpo de prova da roda após 10 5 rev. carga de 588MPa.....	77
Figura 41. Seção transversal do corpo de prova da roda após 100000 revoluções. Carga de 588MPa e 8% de escorregamento.....	78
Figura 42. Variação da dureza a partir da borda de desgaste (8% escorregamento)....	79
Figura 43. Perda de massa vs. número de revoluções para cargas de 294 MPa e escorregamento de 3% de materiais de roda e trilho.....	81
Figura 44. Perda de massa vs. número de revoluções para cargas de 588MPa e escorregamento de 3% de materiais de roda e trilho.....	81
Figura 45. Perda de massa vs. número de revoluções para cargas de 294 e 588MPa e escorregamento de 3% de materiais de roda.....	82
Figura 46. Taxa de desgaste, avaliada por perda de massa (mg) pela distância percorrida (m).....	83
Figura 47. Perda de massa (g) da roda vs. número de revoluções para cargas de 294 e 588 MPa e escorregamento de 3% e 8%.....	84
Figura 48. Seção longitudinal de corpos de prova ensaiados com carga de 588MPa e 3% de escorregamento após 10^5 revoluções.....	85
Figura 49. Seção transversal de corpos de prova ensaiados com carga de 588 MPa e 3% de escorregamento após 10^5 revoluções.....	85
Figura 50. Forma das partículas de desgaste – 588 MPa, 700000 e 100000 revoluções.....	84
Figura 51. Forma das partículas de desgaste – 294 MPa, 700000 e 100000 revoluções.....	85
Figura 52. Comparação entre partículas de desgaste formadas com cargas de 294 e 588 MPa.....	86

Figura 53. Comparação entre partículas de desgaste formadas. Cargas 294 e 588 MPa.	86
Figura 54. Resultado da análise por microsonda da partícula de desgaste.	87
Figura 55. Seção longitudinal de corpo de prova ensaiado a 588 MPa escorregamento de 3% após 1000 revoluções.	88
Figura 56. Variação da dureza em função da distância da superfície ensaiada para cargas de 294 MPa e 588 MPa e 3% de escorregamento.	89
Figura 57. Variação da dureza em função da distância da superfície ensaiada para carga de 588 MPa e escorregamento de 3%.	90
Figura 58. Seção transversal ao sentido do movimento de uma roda CD38 da E.F.C.	92
Figura 59. Seção longitudinal ao sentido do movimento de uma roda CD38 da E.F.C.	95
Figura 60. Trincas de fadiga de contato mostrando o início de formação da escamação em uma roda CD38 da EFC - CVRD.	94
Figura 61. Seção longitudinal de corpo de prova retirado na região das trincas mostradas na Figura 60.	94
Figura 62. Trinca de fadiga de contato com inversão na direção de propagação.	975
Figura 63. Inclusão de sulfeto posicionada próxima ao ponto de inversão de direção da trinca mostrada na Figura 63.	96
Figura 64. Variação da dureza da pista de rolamento para o centro da roda numa região próxima a indicada na Figura 60.	96
Figura 65. Estágios para formação de escamação em rodas na EFC-CVRD	97
Figura 66. Região da pista de rolamento de uma roda que escorregou travada com presença de material deformado formando um calo.	99
Figura 67. Roda com deformação plástica e acúmulo de material deformado no friso devido ao travamento durante a frenagem.	99
Figura 68. Trincas na pista de rolamento de uma roda, conforme mostrado na Figura 66, que escorregou travada sobre o trilho, reveladas através de ensaio com líquido penetrante. Nota-se também fortes riscos de abrasão na parte inferior da pista.	100
Figura 69. Região da pista de rolamento de uma roda que apresentou lascamento.	101
Figura 70. Superfície de uma roda que sofreu escorregamento e transformação martensítica, revelada com persulfato de amônia a 20%.	101

Figura 71. Microestrutura encontrada na região lascada indicada na figura 69.....	102
Figura 72. Microestrutura verificada próximo à pista de rolamento da roda mostrada na Figura 69 em regiões distantes à região lascada.	103
Figura 73. Perda de massa (g) vs. Número de revoluções de um aço de roda com Cr-V e um aço com Cr.	104
Figura 74. Calibre de medição de friso conforme AAR - S - 618 - 77 ^[7]	106
Figura 75. Perfilômetro de lâminas.	106
Figura 76. Variação da espessura do friso das rodas em teste nos vagões GDT da MBR na ferrovia da malha regional sudeste MRS	108
Figura 77. Perfil desgastado de 2 rodas CK36 em teste nos vagões GDT da MBR na Ferrovia da MRS.	108
Figura 78. Representação esquemática do contato. Anexo 1.....	115
Figura 79. Representação esquemática contato roda trilho. Anexo 1.....	117
Figura 80. Tensões e deflexões entre dois corpos em contato em um ponto. Anexo 1..	119

RESUMO

Descreve-se os principais tipos de desgaste atuantes em rodas ferroviárias tais como desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento. No desgaste por deslizamento os principais mecanismos são deformação plástica, fadiga de contato, fadiga termomecânica, oxidação e escorregamento.

Avalia-se o efeito de variáveis como dureza, microestrutura, composição química da liga e escorregamento no desgaste e em seus mecanismos.

Compara-se os tipos e mecanismos de desgaste verificados em rodas ferroviárias utilizadas em trens para transporte de minérios, com os obtidos em laboratório através de ensaio de desgaste disco-contra-disco de materiais de roda e trilho. No ensaio, o desgaste foi medido por pesagem dos corpos-de-prova verificando após distâncias predeterminadas a perda de massa. Avaliou-se a influência da carga, dureza, composição química e escorregamento no desgaste. Verificou-se que o desgaste aumenta com a carga e diminui com o aumento da dureza. Aços de rodas com adição de Cromo e Vanádio apresentam um melhor desempenho em desgaste se comparados com aços AAR M 107/208 Classe B ou C.

Análise microscópica dos corpos-de-prova após ensaio, mostrou que tal como nas rodas em serviço, os tipos de desgaste atuantes foram desgaste abrasivo e por deslizamento com mecanismos diversos como deformação plástica, delaminação e oxidação. Mecanismo semelhante a delaminação é a formação de escamas ou **shelling** em rodas. Verificou-se também a formação de camada branca na superfície desgastada, característico de transformação martensítica em aço. Mecanismo similar a este é o de formação de **spalling** em rodas.

Apresenta-se uma metodologia para desenvolvimento de materiais de rodas, compreendendo ensaios de desgaste em laboratório, produção de rodas e acompanhamento de desempenho em campo, onde se confirma o melhor desempenho de materiais AAR M107/208 classe C com adição de Cromo e Vanádio se comparado com aços convencionais conforme normas AAR M 107/208.

ABSTRACT

The main types of railroad wheels wear, such as abrasive wear and sliding wear are described. The main mechanisms of sliding wear are the plastic deformation, the contact fatigue, thermomechanical fatigue, oxidation and slip wear.

The variables such as hardness, microstructure, chemical composition of alloy and effects of the sliding on wear mechanisms are evaluated.

The wear types and mechanisms detected on wheels and rail materials from the real railroad cars and tracks, from mining company, are compared with those observed at laboratory testing on disc-against-disc wear testing. The wear rate was measured by mass loss after predefined testing distances. The influence of the load, the hardness and the sliding on the wear rate were also evaluated. It was observed that the wear of the wheel materials increases with the load increasing and decreases with the material hardness increasing. A better performance was observed for steels AAR M 107/208 class C with Chromium and Vanadium additions when compared to AAR M 107/208 grade B or C steels.

The microscopic examination of the test specimens, as well as on the wheels removed from service, showed occurrence of the abrasive wear and sliding wear with various mechanisms such as plastic deformation, delamination and oxidation wear. A similar mechanism to the delamination is the **shelling** on wheels. It was observed the formation of white layer on worn surface typical to the martensitic transformation of steel. A similar mechanism is the **spalling** of wheels material.

It is also proposed a methodology for wheel materials development, including laboratory wear tests, the manufacturing of wheels and the use and attendance of the wheels in service. AAR M 208 grade C steels with Chromium and Vanadium additions presented a better performance when compared to the standard AAR M 107/208 steels.

1 INTRODUÇÃO

Assim como outros setores da economia, o setor de transporte ferroviário, principalmente o voltado ao transporte de minério de ferro, tem buscado uma maior competitividade de seus produtos e serviços de modo a garantir sua sobrevivência e prosperidade. Desta forma, redução de custo é imperativo. Uma das maneiras de redução de custo é através do aumento da carga transportada por uma mesma composição, seja através do aumento da carga transportada por eixo, do tamanho do trem ou o aumento da velocidade no trajeto. O que normalmente se verifica é o aumento de todas as possibilidades simultaneamente. Se, por um lado tem-se uma redução de custo uma vez que a mesma composição transporta mais carga e em menor tempo, por outro lado aumenta o custo de manutenção corretiva, uma vez que aceleram as falhas nos componentes dos vagões e via permanente. Tal como os outros componentes, o sistema roda-trilho ou roda-trilho-sapata de freio é sensivelmente afetado por esses aumentos de esforços. Assim como os trilhos na via permanente, as rodas representam destacadamente o maior custo na manutenção do material rodante e a principal causa da retenção de vagões para manutenção corretiva^[1].

A produção mundial de rodas ferroviárias gira em torno de 2 milhões por ano sendo que aproximadamente 1 milhão são produzidas e consumidas nos Estados Unidos. No Brasil consome-se em torno de 60.000 rodas por ano ficando a Companhia Vale do Rio Doce com aproximadamente 30% deste consumo^[1].

Do ponto de vista da engenharia e pesquisa a interface roda-trilho ou roda-trilho-

sapata de freio se constitui num tribossistema de grande interesse em todo o mundo uma vez que além de envolver itens de segurança, apresenta variados mecanismos de desgaste que muitas vezes estão relacionados a importantes transformações metalúrgicas na roda e ou no trilho, resultado de cargas térmicas e mecânicas aplicadas ao tribossistema e inerentes a operação seja do lado da via permanente (trilho) ou do material rodante (roda). Estes mecanismos de desgaste levam a formação de defeitos na pista de rolamento da roda que serão posteriormente responsáveis pelo sucateamento ou retrabalho através de processo de usinagem refazendo desta forma o perfil da sua pista de rolamento.

2 OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho, desenvolvido no Laboratório de Fenômenos de Superfície da EPUSP e Divisão de Tecnologia de Transportes do Instituto de Pesquisas Tecnológica do Estado de São Paulo – IPT tem como objetivo descrever os diversos mecanismos de desgaste que atuam no tribossistema roda-trilho-sapata de freio que levam ou aceleram o desgaste da pista de rolamento da roda, limitando assim sua vida. Comparar esses mecanismos com os obtidos em laboratório, através de ensaio de desgaste disco-contra-disco, de materiais de rodas e trilhos, ensaiados sob condições próximas às reais, levantadas na Estrada de Ferro Carajás da Companhia Vale do Rio Doce para vagões de minério de ferro do tipo GDT (Vagão Gôndola para Descarga em Car-Dumper, bitola de 1,6 m, manga de eixo 165,1 x 304,8 mm [6,5"x12"] e peso bruto de 119 toneladas). E, apresentar uma metodologia a ser utilizada para desenvolvimento e acompanhamento de materiais de rodas ferroviárias e os resultados de desgaste obtidos em campo em lotes experimentais de rodas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Ao longo de suas vidas as rodas são submetidas a esforços de^[2,3,4,5,6]:

- 1.- Carregamento cíclico; rolamento e escorregamento;
- 2.- Carregamento térmico oriundo da operação de frenagem e do deslizamento relativo entre roda e trilho;
- 3.- Impacto nas junções entre trilhos ,nos desvios e nas faces do trilho devido à defeitos superficiais no trilho e ou na roda;

Para resistir a estas solicitações, é necessário um projeto adequado que englobe desenhos e especificações adequadas ao produto.

3.1 Projeto de Rodas

3.1.1 Materiais Empregados

Os materiais normalmente empregados em rodas e trilhos são aços de composições químicas próximas do eutetóide. Os trilhos são produzidos por laminação e as rodas por forjamento a partir de lingotes ou fundidas em moldes de grafite pelo processo baixa pressão. As rodas forjadas encontram sua maior aplicação na Europa em carros de passageiros onde se utilizam menores cargas, enquanto que as fundidas nos Estados Unidos, em vagões de carga^[1]. As especificações que definem as composições químicas, propriedades mecânicas e requisitos de qualidade de rodas ferroviárias são definidas pelas normas AAR^[7] (Association of American Railroads) para o padrão americano e UIC^[8] (Union International Railways) para o europeu. No Brasil adota-se o padrão americano. A Tabela 1 lista as recomendações da AAR para rodas forjadas e fundidas atendendo respectivamente a normas AAR M107/208 em sua última revisão^[7].

Tabela 1 - Composição Química e recomendações para uso de rodas segundo (AAR M-107/M-208^[7])

Classe	Aplicação	Composição Química				Dureza
		C	Mn	Si	P/S	BHN
L	Altas velocidades com severas condições de frenagem e cargas leves nas rodas	0,47 máx.	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	177 a 277
A	Altas velocidades com severas condições de frenagem e cargas moderadas nas rodas (vagões de cargas leves)	0,47 a 0,57	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	255 a 321
B	Altas velocidades com severa frenagem a altas cargas nas rodas (vagões de minério)	0,57 a 0,67	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	277 a 341
C	Serviços com condições leves de frenagem e altas cargas nas rodas ou altas cargas nas rodas com freios fora da pista (carro passageiro)	0,67 a 0,77	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	321 a 363

A Tabela 2 lista as composições químicas das diversas classes de aços para rodas ferroviárias conforme padrão europeu definidas pela norma UIC ^[8].

Tabela 2 - Composição Química conforme norma UIC ^[8] para rodas.

Composição Química (Valores Máximos, %)											
Classe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni
R1	0,48	0,50	0,9	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R2	0,58	0,50	0,9	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R3	0,70	0,50	0,9	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R6	0,48	0,40	0,75	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R7	0,52	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R8	0,56	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R9	0,60	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5

As classes mais empregadas conforme o padrão americano são as classes B e C,

sendo que ambas apresentam microestrutura predominantemente perlítica obtida por processo de normalização. Analisando a Tabela 1 e comparando as classes B e C verifica-se que há uma faixa de dureza comum às duas classes, ou seja, 321 a 341 BHN, porém a composição química se difere no teor de carbono. Como se trata de aços perlíticos ferríticos o teor de carbono é fundamental para definição da dureza e consequentemente das propriedades mecânicas ^[9].

A Tabela 3 lista as propriedades mecânicas de aços de roda ensaiados conforme ASTM A 370 - 94^[10], a partir de corpos de prova retirados da pista de rolamento da roda conforme figura 1 para aços fundidos classe B e C.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas de aços de roda ensaiados conforme ASTM A 370 - 94^[10] a partir de corpos de prova retirados da pista de rolamento da roda, para aços fundidos classe B e C.

Material	Limite de Resistência (LR MPa)	Limite de Escoamento (LE MPa)	Alongamento (%)	Estricção (%)
CLASSE C[7]	1100	883	10	20
CLASSE B[7]	1061	800	16	38

Figura 1. Local de retirada de corpo-de-prova para ensaio de tração^[2].

R. LUDEM^[11], DINER^[12], mostraram a importância da ductilidade do aço da roda face a efeitos combinados de cargas mecânicas e térmicas periódicas aplicadas sobre ela. Isto implica na necessidade de considerável tenacidade e baixa suscetibilidade à trinca térmica. Vários estudos foram orientados para o mecanismo de iniciação de trincas térmicas e o desenvolvimento de aços que sejam menos sensíveis a esse tipo de trinca e com maior tenacidade a fratura. DINER^[12] mostra a influência do teor de C na tenacidade do aço e define que o teor desse elemento deve ser tal que propicie uma microestrutura predominantemente perlítica porém com alguma ferrita livre, o que de certa forma garante a não existência de cementita em contorno de grão, tendo assim um bom equilíbrio entre resistência mecânica e tenacidade. Esses estudos levaram muitas companhias ferroviárias a optarem por aços AAR classe B. Nestes aços adições de ligas como o manganês, silício, cromo e vanádio atuam favoravelmente no aumento de sua resistência mecânica e dureza, através dos mecanismos de endurecimento por solução sólida e por dispersão^[13]. Além disto o aumento do teor destes elementos provoca um deslocamento do ponto eutetóide para a esquerda e conseqüentemente o aumento da fração volumétrica de perlita na microestrutura para menores teores de carbono como é o caso do aço AAR classe B^[13].

3.1.2 Dimensional

Outra característica importante da roda é sua geometria, que, em conjunto com a manga do eixo em que é montada, limita a carga aplicada sobre o eixo. Entre as principais dimensões da roda se destacam o diâmetro externo do aro ou pista de rolamento (dimensão D da Tabela 4), a espessura do friso (dimensão B da Tabela 4), as espessuras mínimas do disco ou alma (dimensão N1 e N2 da Tabela 4), a inclinação na região do

contato com o trilho, a altura do cubo (dimensão P da Tabela 4), e altura do aro (dimensão L da Tabela 4). A espessura do aro (dimensão G da Tabela 4), limita o número de vidas ou possibilidades de reperfilamento da roda após desgastada. As rodas são classificadas conforme a espessura do aro em rodas de uma vida (1W), dupla vida (2W) ou múltipla vida (MW).

As rodas de uma vida não apresentam nenhum sobre-material que a permita ser reperfilada após desgaste ou presença de falhas oriundas da aplicação de esforços nas quais são submetidas. As rodas de dupla vida apresentam a possibilidade de um reperfilamento e as rodas de múltipla vida apresentam sobre-material para três ou mais reperfilamentos. Essa operação é feita com a roda eixada, usinando as duas rodas simultaneamente. Retira-se em torno de 3 a 6 mm de material por reperfilamento e refaz-se toda a pista e friso da roda.

A Tabela 4^[7] mostra as dimensões típicas de rodas mais utilizadas de uma vida (1W), dupla vida (2W) e múltipla vida (MW) e as cargas máximas permitidas por roda conforme AAR M 208 em sua última revisão^[7].

O carregamento, a velocidade, o material, a geometria da roda e do trilho na região do contato entre outras formam um tribossistema que irá determinar o desgaste e o desempenho da roda e trilho durante sua aplicação.

Tabela 4 - Dimensões típicas de rodas ferroviárias de maior utilização e as respectivas cargas máximas aplicadas, conforme AAR M 208 ^[7] (Dimensões nominais - mm).

MODELO	CJ33	CH36	CB38	CJ36	CD29	CR33	CK36	CD38
Tipo	1W	1W	1W	2W	MW	MW	MW	MW
Carga. Máx/roda	12.5 t	14.9 t	17.8 t	14.9 t	10 t	12.5 t	14.9 t	17.8 t
Manga de cixo**	6"x11"	6,5" x 12"	7"x12"	6,5"x 12"	5,5"x 12"	6"x11"	6,5"x 12"	6,5"x 12"
Diâmetro (D)	838.20	914.40	965.20	914.40	743.00	838.20	914.40	965.20
A	25.40	25.40	25.40	25.40	27.00	25.40	25.40	25.40
B	34.90	34.90	34.90	34.90	30.60	34.90	34.90	29.40
C	19.00	19.00	19.00	19.00	17.40	19.00	19.00	17.40
G (mín)	31.70	38.10	38.10	50.80	69.80	63.50	63.50	69.80
L	145.20	145.20	145.20	145.20	133.40	145.20	145.20	145.20
N1 (mín)	15.90	19.00	22.20	19.00	19.00	19.00	19.00	22.20
N2 (mín)	15.90	19.00	28.60	19.00	25.40	19.00	19.00	22.20
P	177.80	177.80	177.80	177.80	168.30	177.80	177.80	177.80
R2	63.50	63.50	63.50	63.50	76.20	63.50	63.50	63.50
Furo(ϕ max)	212.70	225.40	244.50	225.40	196.80	212.70	225.40	244.40
Parede mín. cubo	28.60	28.60	31.70	28.60	28.60	28.60	28.60	31.70
O1/O2	269.90	269.90	308.00	282.60	254.00	269.90	282.60	307.00

** Dimensões indicadas em polegadas por serem assim conhecidas no meio ferroviário

3.2 Tipos e Mecanismos de Desgaste em Rodas Ferroviárias

A Figura 2 ilustra esquematicamente o tribossistema roda-trilho.

Figura 2. Desenho esquemático do tribossistema roda-trilho-sapata.

Os principais tipos de desgaste de rodas são por abrasão e por deslizamento^[1].

3.2.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo tem origem em partículas externas ao sistema roda-trilho-sapata como fragmentos de minérios e areia, entre outros, ou em partículas removidas do sistema oriundas de qualquer de seus três membros e encruadas devido ao movimento relativo entre elas^[1,16]. Ele pode ser a três corpos quando o abrasivo movimenta-se entre o par sapata-roda ou roda-trilho, ou ainda a dois corpos quando o abrasivo se aloja no corpo mais mole, por exemplo a sapata, desgastando a roda como se fosse uma ferramenta de corte. Os coeficientes de desgaste abrasivo a dois e a três corpos são respectivamente^[16] :

0,2 a 0,9 $\text{mm}^3/\text{kg.m}$ e 0,01 a 0,03 $\text{mm}^3/\text{kg.m}$, mostrando a maior severidade do desgaste a dois corpos. A Figura 3^[16,58] ilustra esquematicamente o desgaste por abrasão à dois corpos (a) e a três corpos (b).

Figura 3. Desenho esquemático da abrasão à dois e três corpos^[16,58].

3.2.2 Desgaste por deslizamento

Nas rodas o desgaste por deslizamento pode assumir as formas de desgaste por deslizamento propriamente dito e fadiga de contato ou termomecânica. Os carregamentos cíclicos na pista de rolamento das rodas geram tensões de cisalhamento máximas abaixo da superfície. Com o crescimento do número de ciclos e a eventual ação de intensificadores de tensão podem-se formar trincas sub-superficiais que, orientadas pelas tensões residuais e térmicas, podem deslocar-se para a superfície ocasionando perda de material da roda. Uma primeira abordagem para esta forma de desgaste pode ser feita considerando fadiga de alto ciclo e a mecânica do contato de HERTZ, agravado pelo carregamento das rodas que, muitas vezes, estão acima do limite elástico^[4,63]. Adicionalmente, os carregamentos térmicos reduzem a capacidade de resistência causando ou intensificando a deformação plástica. Nesses casos a fadiga de contato desenvolve-se no campo plástico, devendo ser tratada como fadiga de baixo ciclo^[17]. Para a compreensão

dos mecanismos de desgaste por deslizamento é necessário se entender as condições de solicitação e o comportamento do material da roda em serviço.

3.2.2.1 Alterações microestruturais nas rodas devido à temperatura

A Figura 4 mostra a variação da tensão de escoamento com o aumento da temperatura para um aço AAR Classe C^[6].

Figura 4. Variação da tensão de escoamento com a temperatura. Aço AAR classe C. Adaptado de GALLAGHER^[6].

A combinação de cargas térmicas geradas na frenagem e de elevadas cargas mecânicas a que estão sujeitas as rodas pode causar alterações microestruturais no seu material. Estas alterações poderão vir a reduzir sua resistência mecânica ou ainda fragilizar o material devido à formação ou precipitação de microconstituente de elevada dureza e ou baixa ductilidade^[6,13,15,17,19]. As transformações microestruturais são aceleradas ou facilitadas pela deformação plástica imposta ao material devido as cargas

termomecânicas aplicadas. SAMUEL^[18] mostra a influência da deformação plástica antes e durante o aquecimento na cinética e esferoidização da perlita. Com a deformação plástica ocorre quebra das colônias de perlita, além de um aumento na densidade de discordâncias, aumentando desta forma a energia elástica do material. Segundo SAMUEL^[18], a esferoidização da perlita ocorre segundo três estágios:

1º estágio: Quebra das placas de cementita integrante da perlita em intervalos mais ou menos regulares por crescimento de canais dentro da placa.

2º estágio: Os fragmentos de placas se reduzem progressivamente a valores mínimos e se esferoidizam.

3º estágio: O diâmetro das esferas é aumentado através de crescimento cooperativo ou coalescimento onde as esferas maiores crescem através da eliminação das esferas menores.

A força motriz para o processo é a busca da redução da energia de superfície e do gradiente de composição química devido as variações do teor de carbono na placa de cementita quebrada^[18, 19, 20]. SEHITOGLU^[19] mostrou através de seus experimentos que a deformação plástica produz sub-contornos na cementita que são posteriormente arredondadas por difusão, dirigida pelo gradiente de potencial químico na interface ferrita=cementita. O arredondamento da interface avança nas arestas de cementita até completar a banda da ferrita, formando esferóides do carboneto e separando a ferrita da cementita^[19]. Posteriormente, através de mecanismos de coalescimento a cementita esferoidizada crescerá^[21,22,66]. A Tabela 5 mostra um resumo das conclusões de SEHITOGLU^[19] dos danos causados pela combinação simultânea de deformação plástica e temperatura em microestruturas de aços de rodas conforme AAR M208 classe C com 0,7% de carbono.

Tabela 5 - Sumário dos dos mecanismos de danos microestruturais em aços de rodas devido a combinação de deformação plásticas e temperaturas^[19].

FADIGA TERMOMECÂNICA -SUMÁRIO DOS MECANISMOS DE DANOS MICROESTRUTURAIS

AÇOS DE RODAS FERROVIÁRIAS

FADIGA TERMOMECÂNICA - MÁXIMA TEMPERATURA COINCIDE COM A MÁXIMA DEFORMAÇÃO	FADIGA TERMOMECÂNICA - MÁXIMA TEMPERATURA COINCIDE COM A MÍNIMA DEFORMAÇÃO
<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento de trincas nos contornos das colônias de perlita; interfaces perlita-ferrita; • Ataque interno pelo oxigênio às partículas de MnS; • Esferoidização da perlita lamelar; • Coalescimento da perlita lamelar; • Transformação de fase CCC - CFC • Recristalização. 	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito do envelhecimento por deformação devido a exposição a elevadas temperaturas, seguida por baixas temperaturas; • Formação e fratura repetida de óxidos; • Ataque interno pelo oxigênio às partículas de MnS; • Esferoidização da perlita lamelar; • Coalescimento da perlita lamelar.

A Figura 5^[37] mostra uma roda apresentando deformação plástica após uso, com excessivo escoamento lateral.

Figura 5. Região da pista de rolamento de uma roda típica da Estrada de Ferro Carajás, apresentando intensa deformação plástica^[17].

Como visto, no aquecimento gerado na frenagem pode-se alcançar temperaturas em que as lamelas de cementita quebradas devido à deformação plástica esferoidizem e coalesçam, buscando reduzir sua energia de superfície e dando origem a uma microestrutura com propriedades mecânicas (resistência) inferiores a da perlita lamelar, sendo portanto mais passível de deformação plástica posterior, o que intensificaria o problema. Ou ainda, dependendo do aporte de calor, atingir temperaturas em que localmente o material sofra uma transformação austenítica, o que posteriormente dependendo da velocidade de resfriamento imposta pelo próprio metal da roda em regiões adjacentes a aquecida, verificar-se uma transformação martensítica localizada com formação de microestrutura de elevada dureza e fragilidade^[6,19,35].

A temperatura afeta ainda a ductilidade dos aços para rodas. R. LUDEN^[11], FEC & UTRATA^[23], FERREIRA^[17] mostram a influência da temperatura na queda de

ductilidade de um aço UIC-R7 equivalente ao aço AAR M 208 Classe A e em aços AAR Classe B e C. Estudos realizados por MOYAR & STONE^[25] em aço AAR classe C confirmaram a fragilização do material em temperaturas próximas de 200°C e também sugerem que as trincas de fadiga de contato tem sua formação acelerada pela queda de ductilidade. A Tabela 6 lista a variação de coeficiente de ductilidade à fadiga por cisalhamento [γ_f] em função da temperatura para aços AAR Classe C segundo MOYAR & STONE^[25].

Tabela 6 - Variação do coeficiente de ductilidade à fadiga [γ_f] com a temperatura em ensaios de fadiga por torção para aços AAR classe C^[25]

Propriedade	25°C	200°C	400°C	480°C	600°C
γ_f	2.938	0.233	13.816	9.390	3.051

Medidas feitas com rodeiro instrumentado em vagões de minério tipo GDT com peso bruto de aproximadamente 120 t, portanto 15 t por roda, pelo agrupamento ferroviário da divisão de transportes do Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo na Estrada de Ferro Carajás -EFC, Companhia do Vale Rio Doce, mostrou que os vagões carregados trafegam por períodos acima de 1 hora (aproximadamente 5% do percurso) em temperaturas entre 190 e 250 °C^[17]. Estudos realizados por FERREIRA^[17] a partir de dados levantados com rodeiro instrumentado na Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD mostraram uma queda acentuada na resistência à fadiga de aços de rodas por estes serem utilizados em temperaturas fragilizantes naquela ferrovia. Segundo FERREIRA^[17] a previsão de quilometragem rodada entre reperfilamentos na Estrada de Ferro Carajás-

EFC seria de aproximadamente 382.000 Km, mas, devido a sua utilização, mesmo que em curtos períodos, na faixa de temperatura entre 150°C e 250°C a estimativa de vida prevista é reduzida para 167.000 Km^[17].

Os mecanismos de desgaste por fadiga termomecânica, micro e macroescorregamentos e deformações plásticas excessivas atuantes no desgaste por deslizamento na pista de rolamento da roda podem dar origem a diversos defeitos na pista de rolamento da roda que serão posteriormente responsáveis pelo seu desgaste acelerado, retrabalho através de processo de usinagem ou até mesmo sucateamento da roda.

Os defeitos típicos apresentados na pista de rolamento das rodas são:

- 1.- Escamação ou “Shelling”
- 2.- Proa ou “Calo”
- 3.- Lascamento ou “Spalling”
- 4.- Trincas térmicas

3.2.2.2 Escamação ou “Shelling”

GALLAGHER et al^[6], KIGAWA^[26], MUTTOW & DUDEK^[27], KUMAGAI et al^[28] e SEHITOGHU^[19] definem a escamação como um defeito que ocorre devido a ação combinada de fadiga de contato e cargas térmicas sendo portanto um processo de fadiga termomecânica. Esses esforços combinados criam trincas que levam ao destacamento de material ao longo de toda superfície de rolamento da roda.

R. LUDEN^[11], FEC & UTRATA^[23], FERREIRA^[17] mostraram a influência da

temperatura na queda de ductilidade de aço para roda e sugerem que as trincas de fadiga de contato para formação de escamação estão relacionadas a queda de ductilidade devido a fragilização que ocorre em aços de roda em faixas de temperatura próximas de 200°C.

SANTOS & RODRIGUES FILHO^[29, 30] sugerem que a escamação se dá a partir de trincas que se propagam a 45° da superfície podendo este ângulo ser reduzido a 30° em função dos efeitos da rotação. Estas trincas ocorrem como resultantes do escoamento do material causado por fortes tensões compressivas na região de contato e são intensificadas por tensões térmicas. Segundo eles, estas trincas se propagam na direção de maior tensão de cisalhamento conforme mecânica do contato de Hertz. O processo culminaria com o destacamento de material. Logo seria fundamentalmente mecânico, mas fortemente influenciado pela temperatura. Estudos realizados na Companhia Vale do Rio Doce, Estrada de Ferro Carajás em 1989^[29], mostraram que vagões com freios isolados, ou seja, sem atuação de freio e portanto sem aquecimento, não apresentaram este problema com até três vezes o percurso médio de aparecimento de escamação. Entretanto com o passar do tempo o dano surgiu. Os resultados mostrados por SANTOS & RODRIGUES FILHO^[29] de uma certa forma evidenciam os resultados obtidos por FERREIRA^[17].

A Figura 6^[20] ilustra a escamação em dois estágios, sendo a Figura 6 (a) um estágio inicial com pequenas trincas paralelas ao longo de toda pista e a Figura 6 (b) as crateras já formadas. Este defeito também é verificado em trilhos. A Figura 7^[5] ilustra a escamação em trilhos da Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD, também em dois estágios.

(a) Estágio Inicial

(b) Crateras formadas

Figura 6. Estágios para formação de escamação em rodas^[20].

(a) Estágio inicial

(b) Estágio avançado

Figura 7. Escamação em trilhos da Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD^[5].

MAGEL & KALOUSEK^[4] propõe que a escamação está relacionada com a deformação plástica imposta ao material da roda durante o serviço e pode ser analisado com base no diagrama proposto por JOHNSON^[31] conhecido como Diagrama de Shakedown. BASSIN^[32] descreve que como a deformação plástica causa encruamento do material e gera tensões residuais com tendência a inibir futuras deformações plásticas durante os subseqüentes ciclos de carga, a possibilidade de existir tensões residuais conduz o sistema para um estado estabilizado em que o ciclo não é mais plástico e sim totalmente elástico. Este processo é conhecido como Shakedown, e, a máxima carga sob a qual o material se comporta elasticamente após ter sofrido deformações plásticas anteriores é conhecido como Limite de Shakedown. A Figura 8^[31] ilustra o Diagrama de Shakedown que relaciona a razão (P_o/k_o) , máxima tensão de contato (P_o) sobre a tensão de cisalhamento do material (k_o) com o coeficiente de atrito (μ), definido como força tangencial (T) sobre carga normal (W).

Figura 8. Diagrama de Shakedown^[31].

Segundo MAGEL & KALOUSEK^[4], quando o sistema trabalha na região de deformação plástica repetitiva o material escoá-se incrementalmente a cada ciclo de carregamento reduzindo sua ductilidade o que culminaria com a nucleação da trinca. Como o escoamento incremental tipicamente ocorre mais rápido na superfície, a maioria das trincas de fadiga de contato seriam superficiais. As trincas sub-superficiais se formariam em inclusões não-metálicas ou porosidades internas do aço. MAGEL & KALOUSEK^[4] propõe um modelo para iniciação da trinca de fadiga de contato de rolamento combinando o Diagrama de Shakedown à teoria Hertiziana para contato elástico. Esta combinação resulta em plasticidade sob as condições:

$$0 < \mu < 0.3 : (P_o/H) > (4/H) \times (W E^2 / Re^2)^{1/3} \quad \text{Equação 1}$$

$$0.3 < \mu < 0.6 : (P_o/H) > (1/\mu H) \times (W E^2 / Re^2)^{1/3} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

μ : coeficiente de atrito

H: dureza do material

W: carga normal

E: módulo de elasticidade

Re: raio equivalente associado a geometria do contato, sendo:

$$Re = [(1/R_{wt}) + (1/R_{rt}) \times (1/R_{wl}) + (1/R_{rl})]^{-1} \quad \text{Equação 3}$$

Rwt: raio da roda na direção transversal

Rwl: raio da roda na direção longitudinal

Rrt: raio do trilho na direção transversal

Rrl: raio do trilho na direção longitudinal

A Equação 1 descreve uma situação onde a trinca nucleia-se abaixo da superfície e a Equação 2 indica que a trinca se inicia na superfície. Pelas Equações 1 e 2, tem-se ainda que o escoamento incremental que reduz a ductilidade do material é aumentado quando^[4]:

- 1.- Aumenta a tensão seja através do aumento da carga P ou redução da área de contato;
- 2.- Amolecimento do material devido ao aquecimento (queda de propriedades elásticas, transformações de fase);
- 3.- Aumento do coeficiente de atrito seja em períodos de estiagem ou devido à eliminação do filme de óxidos na interface roda-trilho.

As trincas de fadiga de contato que dão origem à escamação podem se propagar conforme os modos de propagação **I** ou **II** ou ainda uma combinação dos dois modos dependendo da orientação da trinca, direção e tamanho do escorregamento, geometria do contato e valor da carga. O modo **I** corresponde à fratura onde a superfície da trinca se deslocam normalmente à elas mesmas, caso típico da fratura por tração^[33]. O modo **II** corresponde à fratura em que as superfícies da trinca cisalham entre si em uma direção normal à aresta da trinca^[33].

A direção da trinca formada na pista de rolamento está diretamente relacionada com o tipo de escorregamento. A Figura 9^[4] mostra as possíveis direções da trinca em função da direção do arraste. Na Figura 9 (a) temos trincas circunferenciais devido ao escorregamento lateral, na Figura 9 (b) temos trincas axiais devido ao escorregamento longitudinal e na Figura 9 (c) temos trincas oblíquas devido à combinação de escorregamento lateral e longitudinal.

Figura 9. Possíveis direções da trinca em função da direção do escoamento^[4].

3.2.2.3 Formação de Calo

O escoamento da roda travada por frenagem sobre o trilho pode gerar uma energia térmica localizada capaz de elevar a temperatura na região do contato no lado da roda à valores próximos ou mesmo acima da zona crítica do material atingindo assim o campo austenítico do diagrama Ferro-Carbono. Estando o material nesta faixa de temperatura, a deformação plástica localizada pode-se tornar intensa causando amassamento do material conhecido como “Flat” ou ainda um acúmulo de material deformado plasticamente na frente da região de contato no sentido do movimento gerando na pista de rolamento ou friso da roda um “calo” [3,4,6,35,37,66]. Este processo parece ser semelhante a formação de “proa” como verificado por KATO^[34] no desgaste por deslizamento. A Figura 10^[20] mostra a pista de rolamento de uma roda que sofreu escoamento travada por frenagem sobre o trilho, com formação de Flats e pequenos calos.

Figura 10. Pista de rolamento de uma roda que sofreu escorregamento travada por frenagem sobre o trilho, com formação de Flats e pequenos calos^[20].

3.2.2.4 Lascamento ou “Spalling”

Quando a energia térmica gerada no escorregamento da roda travado sobre o trilho for suficiente para aquecer o material localmente a temperaturas acima da temperatura de austenitização do aço e o resfriamento posterior imprimido pelo próprio meio seja suficientemente brusco para que não sejam cortadas as linhas de transformação da curva de resfriamento contínuo deste aço, haverá formação de martensita localizada. Esta fase é extremamente dura e frágil e fraturará sob posteriores ciclos de carga iniciando trincas na superfície da roda que se propagam retirando lascas da pista de rolamento. A Figura 11^[17] mostra uma parte da pista de rolamento de uma roda que sofreu travamento durante a frenagem com formação de martensita localizada e material lascado ^[4,6,17,19,28,32,35,68].

Figura 11. Pista de rolamento de uma roda da EFC-CVRD que sofreu travamento durante a frenagem com escorregamento e posterior lascamento de material ^[17].

Estudos feitos por JERGEUS et al^[35] sobre a formação de martensita durante o escorregamento indica que ela está relacionada a energia térmica gerada no escorregamento e é função de carga sobre a roda, velocidade do trem, coeficiente de atrito na interface roda-trilho durante arraste, coeficiente de dissipação do calor da roda e ao tempo de escorregamento. Segundo ele, a martensita somente é formada por certas combinações da energia gerada e a duração do escorregamento. A Figura 12 sintetiza o estudo de JERGEUS et al ^[35]. Abaixo da região escura não temos energia suficiente para austenitização, logo não teremos formação de martensita. Acima da região escura o volume de material aquecido ao redor da região escorregada é muito grande e não permite um resfriamento rápido, necessário a transformação martensítica.

Figura 12. Estudos realizados por JERGEUS et al^[35] sobre formação de martensita durante o escorregamento da roda.

Para determinar a energia térmica (E) gerada durante o escorregamento JERGEUS et al^[35] propuseram o modelo descrito nas Equação 4.

$$E = \alpha \mu \cdot mg \cdot u \cdot \Delta t$$

Equação 4

onde:

E: Energia térmica

μ : coeficiente de atrito

mg: carga

u: velocidade

α : fração total de calor escoada para dentro da roda ($\alpha \cong 0,5$)

Δt : tempo de escorregamento.

Figura 13. Desenho esquemático do modelo utilizado por JERGEUS et al ^[35].

O lascamento ou spalling pode ser detectado através de ataque químico adequado com solução de persulfato de amônia a 20%, uma vez que ocorre ataque diferencial entre a parte transformada e a não transformada ^[6]. A Figura 14 mostra a superfície de uma roda que sofreu escorregamento e transformação martensítica, revelada com persulfato de amônia a 20% ^[6].

Figura 14. Superfície de uma roda que sofreu escorregamento e transformação martensítica, revelada com persulfato de amônia a 20% ^[6].

3.2.2.5 Desgaste Oxidativo

HUTCHINGS ^[6] relata a influência do deslizamento na taxa de oxidação de um

metal, e comenta que sob condições de deslizamento, mesmo a baixas temperaturas ambientes, a taxa de oxidação do metal é muito maior que sob condições estáticas. Este forte aumento da oxidação devido ao deslizamento possivelmente é resultado do aumento das taxas de difusão através da camada de óxido, que face a grande quantidade de defeitos causados pela quebra mecânica das camadas, facilitam a difusão através da mesma.

Durante o escorregamento, pode-se atingir temperaturas passíveis de transformação de fase nos aços de rodas e, nessas temperaturas, as taxas de oxidação são intensas, chegando o óxido formado a atingir camadas com espessuras apreciáveis de vários microns em pequenos intervalos de tempo. Se, por um lado, a presença de óxidos no contato reduz o coeficiente de atrito e a possibilidade de adesão no local o que é favorável ao melhor comportamento do material da roda e trilho, como mostrado por BEAGLEY et al^[41], por outro lado a formação de espessos filmes de óxidos também aceleram o desgaste. Durante os ciclos subseqüentes de deslizamento estes óxidos formados de maneira acelerada pelas perturbações mecânicas e térmicas no contato (quebra do óxido, cisalhamento de camadas subsuperficiais de óxidos, flutuações de temperaturas e flashes temperaturas elevadas) se quebram e se destacam em forma de partículas de desgaste. Como elas se destacam, o material fica rapidamente exposto à reoxidação. Segundo HUTCHINGS^[16], muitas propostas tem sido feitas para detalhar os mecanismos através dos quais partículas de óxidos se destacam como partículas desgaste. Uma delas propõe que a oxidação formada em uma aspereza, acelerada pelo aumento da temperatura, é raspada no ciclo posterior pelas condições do contato expondo novamente a aspereza do metal a re-oxidação. Desta forma tem-se um ciclo **oxidação, raspagem, re-oxidação** do

material. As partículas se soltam, mas, devido as compressões no contato, podem se aderir à partículas maiores que se formaram anteriormente, e, se destacarão posteriormente.

ARONOV & KALPAKJIAN^[40] empregando ensaios de desgaste disco-contra- disco, estudaram a cinética do desgaste de aços de rodas e trilhos em condições desgaste severo sem lubrificação, e propuseram um modelo para formação de partículas de desgaste e óxidos durante o ensaio. Segundo ARONOV & KALPAKJIAN^[42], o número de partículas formadas (m) por unidade de volume (Δv) por unidade de tempo (Δt) é dada pela Equação 5:

$$m(\Delta v) = C_1(A_1 \Delta v)^\delta \cdot (\Delta t) \quad \text{Equação 5}$$

onde :

C_1 : constante

δ : função das propriedades do material

A_1 : energia para formação de uma partículas

3.2.3 Trincas Térmicas

As trincas térmicas são distinguíveis na aparência das trincas de fadiga termomecânicas que dão origem à escamação pela sua orientação e comprimento. Ao passo que as trincas que dão origem à escamação tendem a ser finas, longas e formando ângulos na pista de rolamento das rodas, as trincas térmicas mostram a separação entre as faces da trinca e são sempre axialmente orientadas. As trincas térmicas são devido ao acúmulo de tensões térmicas a partir de ciclos repetitivos de aquecimento e resfriamento tal como ocorre em operações de fortes frenagens^[4]. Estas trincas estendem-se para

dentro do material podendo, em função do estado de tensões em que se encontra a roda, se propagar levando-a à fratura ^[6,42,44]. A presença dessas trincas é um forte indicador de problemas de freio no vagão ^[4]. A Figura 15^[37] mostra a pista de rolamento e o friso de uma roda apresentando trincas térmicas.

Figura 15. Pista de rolamento de uma roda apresentando trincas térmicas ^[37].

GALLAGHER et al^[44] realizaram estudos utilizando um dinamômetro conforme ilustrado na Figura 16 e mostraram a influência do posicionamento da sapata aplicada sobre a pista de rolamento da roda durante uma operação de frenagem, sobre a formação de trincas térmicas no friso da roda. Quando ocorre um deslocamento da sapata deixando esta de se posicionar na linha tape e vindo a concentrar sua atuação sobre o friso, um aporte de calor elevado é transferido para esta região que é fina, atingindo localmente temperaturas em que fatalmente ocorrem transformações de fase com formação de perlita esferoidizada e até martensita. Posteriormente trincas térmicas se formam ao longo de todo friso. Estas trincas são extremamente perigosas uma vez que se propagam por fadiga para o interior da roda durante os ciclos alternados de carregamento levando-a à fratura.

Figura 16. Dinamômetro utilizado por GALLAGHER et al^[44] para estudar mecanismos de falhas em flanges de rodas. Equipamento consiste de dois truques ferroviários montados um contra o outro sendo o superior motorizado de forma a permitir os movimentos de rotação tendo as rodas com seu perfil original. O rodeiro do truque inferior tem sua pista de rolamento usinada conforme perfil do trilho. O sistema representa condições bem próximas às de campo.

A Figura 17^[44] mostra o posicionamento incorreto de sapata de freio durante a operação de frenagem. Verifica-se que a sapata apoia no flange (friso) como indicado pela seta, chegando a desgastá-lo, sendo que o correto era estar centralizada na pista de rolamento da roda (linha Tape). A Figura 18^[44] mostra a falha por fadiga que se propagou a partir de trincas térmicas induzidas no flange da roda pelo posicionamento incorreto da sapata na operação de frenagem.

Figura 17. Posicionamento incorreto de sapata de freio, atuando sobre o flange^[44].

Figura 18. Falha por fadiga que se propagou a partir de trincas térmicas induzidas no flange da roda pelo posicionamento incorreto da sapata na operação de frenagem^[44].

3.3 Efeito das variáveis metalúrgicas e escorregamento no comportamento de materiais de rodas

Os defeitos: **escamação**, **lascamento**, **calo** e **trincas térmicas** associadas à **abrasão** e **oxidação** danificam a superfície de rolamento da roda e obrigam o seu sucateamento ou reperfilamento da pista de rolamento por usinagem. Os problemas verificados nas rodas

ocorrem em escala semelhante nos trilhos e representam em conjunto um significativo custo na manutenção do material rodante e via permanente. Analisando o problema do desgaste de rodas e trilhos, pode-se verificar duas maneiras de se atuar para redução dos danos causados pelo desgaste e conseqüentemente reduzir os custos operacionais de manutenção seja da via permanente (trilho) ou do material rodante (roda). Uma maneira seria através de mudanças no material e a outra na geometria do contato através do aumento da área de contato com vistas a reduzir as tensões. FERREIRA^[17] mostrou a variação da tensão de contato devido a mudança na geometria do contato que ocorre devido ao desgaste ao longo da vida da roda e trilho. Desta forma, uma mudança no projeto modificando o perfil de contato roda - trilho teria um efeito relevante somente no caso de rodas e trilhos novos ou reperfilados conforme perfil original e sem desgaste. Face a isso, estudos tem sido orientados na busca constante de materiais de melhor desempenho em desgaste para rodas e trilhos bem como melhor comportamento dinâmico do veículo ferroviário buscando reduzir ou equacionar variáveis como micro e macroescorregamento conhecidos como “creepage” definido como deslizamento relativo entre a roda e o trilho^[4,32,60].

3.3.1 Efeitos de variáveis metalúrgicas no desgaste de materiais de rodas ferroviárias

HIRAKAWA et al ^[9], TYFOUR et al^[38], CLAYTON^[13, 15, 39], SINGH et al^[43], FEGREDO et al ^[45], KALOUSEC et al ^[48], GARNHAN et al^[14], SEHITOGLU^[19], MARKOV ^[46], BEYNON et al ^[47] estudaram os efeitos de variáveis metalúrgicas como dureza, composição química, microconstituintes e espaçamento interlamelar da perlita utilizando ensaios de desgaste disco-contra-disco e pino-contra-disco.

3.3.1.1 Efeito da dureza

HIRAKAWA et al^[9] citam que a resistência ao desgaste aumenta com a dureza. Os resultados apresentados por HIRAKAWA et al^[9] estão de acordo com o modelo de ARCHARD^[16] que define a taxa de desgaste (Q) como descrito pela Equação 6.

$$Q = k (W/H)$$

Equação 6

Sendo, k: coeficiente de desgaste (função do material)

W: carga normal e H: dureza

CLAYTON^[39] desenvolveu estudos em aços de trilhos com microestruturas perlíticas utilizando máquina de desgaste Amsler para ensaio de desgaste disco-contra-disco e comparou a influência da dureza na taxa de desgaste. Os resultados são mostrados na Figura 19 e são avaliados por taxa de desgaste expressa em perda de massa (mg) por metro rodado (m) por milímetro de largura de contato (mm).

Figura 19. Variação da taxa de desgaste com a dureza. Adaptado de CLAYTON^[39].

Porém, uma análise somente da dureza não é suficiente. Segundo HIRAKAWA et al^[9] deve-se correlacionar a dureza a microestrutura. Aumentos de dureza obtidos através de redução de temperatura de revenido para microestruturas martensíticas afetam o comportamento do desgaste, gerando maiores taxas de desgaste. Isto estaria relacionado aos mecanismos de desgaste com formação e propagação de trincas e arrancamento de material. Ao contrário, aumento da dureza devido ao aumento da taxa de resfriamento obtendo microestruturas perlita fina, o efeito na taxa de desgaste é pronunciado.

3.3.1.2 Efeito da composição química no desgaste

CLAYTON^[13] estudou as relações entre desgaste e as propriedades básicas do material como sua composição química. As adições de elementos de liga reduzem o percentual de ferrita livre na microestrutura e possibilita a obtenção de microestruturas perlíticas com menores teores de carbono uma vez que adições de elementos de liga como Mn, Mo, V e Cr deslocam o ponto eutetóide do diagrama Ferro-Carbono para a esquerda, ou seja, aumenta a fração volumétrica da perlita para teores menores de carbono. O Mn atua ainda no sentido de reduzir a temperatura de reação eutetóide o que favorece a obtenção da perlita fina (redução do espaçamento interlamelar). O Si atua na microestrutura através do aumento da resistência da ferrita por formação de solução sólida^[13, 49, 50, 51]. Elementos como Cr, Mo e V que são fortes formadores de carbonetos atuam favoravelmente no sentido de estabilizar o carboneto, mantendo assim a microestrutura mais estável e retardando um possível processo de esferoidização do carboneto da perlita, que, como mostrado na seção 3.2.2.1, causa redução das propriedades mecânicas do material^[50,51]. CLAYTON^[13] apresenta uma relação entre a taxa de desgaste e a composição química de aços perlíticos - ferríticos em função dos

teores de C, Mn e Si descritos na equação 6. A Figura 20 mostra graficamente a variação da taxa de desgaste com a composição química segundo modelo proposto por CLAYTON^[13].

$$\text{Taxa de desgaste} = -0,1427(\% \text{ em peso}) (C + Mn/4,75 + Si/10) \text{ mm}^3 \text{ cm}^{-1} \text{ Equação 7}$$

Figura 20. Variação da taxa de desgaste com a composição química. Adaptado de CLAYTON^[13].

As adições de elementos de liga também atuam no sentido de aumentar a profundidade de endurecimento no tratamento térmico. Para rodas de múltiplas vidas a capacidade de obtenção de dureza em maiores profundidades é um fator importante para manutenção do mesmo comportamento do material após desgaste e reperfilamentos. DEMILLY et al^[51] mostram a influência de elementos de liga como Cr, Mo e V na vida da roda utilizadas em vagões de minério na Estrada de Ferro Carajás e na Ferrovia da Mauritânia e concluem ser estes elementos benéficos no sentido de reduzir o desgaste.

Porém, deve-se tomar cuidado para que não aumente demasiadamente a temperabilidade, uma vez que aumentaria a tendência de se obter microestruturas martensíticas e bainíticas durante a operação de resfriamento contínuo no tratamento térmico, sabendo que a microestrutura que se objetiva ter em materiais de rodas é perlita fina^[6, 9, 11, 13, 15, 48].

3.3.1.3 Efeito da Microestrutura

3.3.1.3.1 Efeito da Ferrita livre

A presença de ferrita livre na microestrutura reduz a resistência ao desgaste uma vez que a ferrita reduz a dureza e conseqüentemente as propriedades mecânicas aumentando assim as deformações plásticas do material em serviço. HIRAKAWA et al^[9], CLAYTON^[13, 39], mostraram a influência da ferrita livre em microestruturas de materiais de roda e trilho e concluíram que a medida que aumenta o percentual de ferrita livre reduzindo conseqüentemente a fração volumétrica de perlita, reduz a resistência ao desgaste. Os esforços combinados de carga térmica e mecânica geram deformações plásticas no material que se dão através de movimentos de discordâncias e a presença deste microconstituente cria no material corredores que permitem com relativa facilidade a movimentação dessas discordâncias. A estrutura cristalina da ferrita ou Fe- α é cúbica de corpo centrado e possui 48 sistemas de deslizamento possíveis, segundo a direção [111] e os planos de deslizamento {110}, {112} e {123}^[53]. Com o aumento da temperatura outros planos podem apresentar deslizamento^[53]. Elementos de liga que formam com a ferrita solução sólida melhoraram o comportamento da microestrutura uma vez que irão dificultar o movimento das discordâncias na ferrita através de mecanismos de encruamento visto que estes elementos atuam como barreiras para movimentação das discordâncias^[49].

A Figura 21 mostra a influência da fração volumétrica de ferrita livre na microestrutura na resistência ao desgaste avaliado por perda de massa (g) de aços de rodas ferroviárias a partir de estudos realizados por HIRAKAWA^[9] utilizando ensaio de desgaste disco-contra-disco. Verifica-se que o aumento da fração volumétrica de ferrita diminui a resistência ao desgaste

Figura 21. Variação da resistência ao desgaste com a fração volumétrica de ferrita livre na microestrutura de aços perlíticos-ferríticos de rodas. Adaptado de HIRAKAWA et al^[9].

3.3.1.3.2 Espaçamento interlamelar

FEGREDO et al^[45], HIRAKAWA et al^[9], SINGH et al^[43], CLAYTON^[13], estudaram o efeito do espaçamento interlamelar da perlita sobre o desgaste de materiais de rodas e concluíram que quanto menor o espaçamento, maior a resistência ao desgaste. HIRAKAWA et al^[9] comentam que isso deve-se ao fato que menores espaçamentos lamelares proporcionam uma maior dureza para a microestrutura.

KALOUSEK^[48] descreve que quanto menor o espaçamento interlamelar menor a distância que uma discordância percorre na ferrita, sendo imediatamente bloqueada pela cementita. SINGH et al^[42] relata que uma redução no espaçamento tem um forte efeito na redução do desgaste de aços de trilhos no caso do desgaste por deslizamento e relaciona seu efeito com mecanismos de delaminação e desgaste severo. KALOUSEK^[48] descreve que ocorre uma transição de desgaste moderado para severo, caracterizado por deformação plástica devido ao contato entre as asperezas dos corpos em contato ou por delaminação, caracterizado por nucleação e crescimento de trincas sub-superficiais, quando se passa de perlita fina para média ou grossa ou mesmo perlita esferoidizada cujos espaçamentos entre carbonetos são muito grandes, uma vez que o substrato tem uma maior deformação plástica durante a aplicação dos esforços e rompe-se o filme de óxido da interface passando a haver contato direto entre as asperezas dos corpos em contato. CLAYTON^[13] descreve que a tensão de escoamento é compatível com a tensão necessária para mover uma discordância na ferrita entre duas paredes impenetráveis de cementita. Segundo CLAYTON^[13], as tensões aumentam com a redução do espaçamento interlamelar.

3.3.1.3.3 Comparação entre perlita e outras microestruturas de aços de rodas

FEGREDO et al^[45] HIRAKAWA et al^[9], KALOUSEK et al^[48] estudaram o efeito da microestrutura no desgaste de aços de roda e concluíram ser a perlita fina a microestrutura que melhor se comporta face a efeitos combinados de cargas térmicas e mecânicas. FEGREDO et al^[45] cita que o melhor desempenho da perlita fina se deve à distância entre carbonetos que é menor na perlita fina que em outras microestruturas, e dessa forma as discordâncias caminham por um menor percurso e são imediatamente bloqueadas. É

comum na perlita fina espaçamento interlamelares menores que $0,1\mu\text{m}$ contra espaçamentos entre carbonetos na martensita revenida de 3 a $4\mu\text{m}$ ^[45].

CLAYTON^[67] comenta que o desempenho da perlita fina é tanto melhor se comparado com outras microestruturas quanto maior a severidade do desgaste ou a tensão aplicada sobre o par roda-trilho. Porém, para desgastes moderados e aços com baixo teor de carbono, o desempenho da microestrutura bainita inferior pode ser beneficiado se comparado com a perlita fina, face a sua melhor ductilidade, tenacidade e soldabilidade que no caso do trilho são propriedades importantes. HIRAKAWA et al^[9] comparam, empregando ensaio de desgaste disco-contra-disco, o comportamento de microestruturas perlíticas e martensita revenida e concluíram ser o desempenho da perlita fina até 3 vezes superior ao da martensita revenida para uma mesma dureza. Segundo eles, isto deve-se ao tamanho e morfologia dos carbonetos que para o caso da martensita revenida, se apresentam em formas esféricas e grandes, ocupando menor espaço na matriz. Um resultado semelhante foi obtido em ensaios de desgaste abrasivo, verificando-se melhores desempenhos quando a matriz era perlítica e não de martensita revenida^[62].

3.3.2 Efeito do escorregamento “creepage”

GARNHAN & BEYNON^[14] mostraram que o escorregamento atua na perda de massa para ensaios disco contra disco em máquinas AMSLER. Segundo GARNHAN & BEYNON^[14] a taxa de desgaste (Q) varia linearmente com a relação $(T.\gamma / A)$ onde (T), derivado da Lei de Amonton é a força tangencial definida por carga normal (W) multiplicada pelo coeficiente de atrito na interface (μ) e portanto, referente à força de atrito na zona de contato, (γ) é a relação entre distância escorregada e a distância rolada e

A é a área de contato. $(T.\gamma/A)$ é uma expressão de trabalho por unidade de área de contato). CLAYTON^[67] também mostra que a taxa de desgaste avaliada em ensaio de desgaste disco-contra-disco em máquina Amsler varia inversamente com o produto $(T.\gamma/A)$.

PRITCHARD & PEARCE^[60] relaciona o produto $T.\gamma$ com a taxa de desgaste Q em ensaios disco-contra-disco em máquinas AMSLER sem lubrificação e relata que o regime de desgaste esta relacionado ao número dado por $T.\gamma$. Para valores de $T.\gamma$ menores que 200N trabalha-se em condição de desgaste moderado associado predominantemente com processos oxidativos envolvendo geração e destruição de finos filmes de óxidos mas com presença de finos flocos metálicos variando entre 2-3 μ m. Para valores de $T.\gamma$ variando entre 200 N e 400 N trabalha-se em uma transição de desgaste moderado para severo, onde os flocos metálicos são maiores, porém ainda com presença de óxidos. Para valores maiores que 400 N trabalha-se invariavelmente num regime de desgaste severo onde os flocos são predominantemente metálicos gerados pela deformação plástica devido ao contato das asperezas e delaminação^[16,59,60]. Logo, existe uma relação direta entre o escorregamento e a taxa de desgaste e comportamento do desgaste. Ferrovias que trabalham com elevadas cargas por eixo e apresentam curvas de pequeno raios os problemas com escorregamento se tornam, mais críticos^[60].

HIRAKAWA et al^[9] mostraram a relação entre perda de massa em função do escorregamento e relaciona este valor com a dureza do material. Segundo HIRAKAWA et al^[9], para durezas menores que 250 BHN o efeito do escorregamento é pequeno. Porém, para durezas maiores que 300 BHN o efeito é significativo.

3.4 Conclusões da Revisão Bibliográfica

- 1.- Os materiais com melhor desempenho em rodas ferroviárias são aços com composição química próximas do eutetóide;
- 2.- A microestrutura que melhor se comporta face às solicitações termomecânicas a que estão sujeitas as rodas ferroviárias é a perlita fina. Isto se deve ao espaçamento entre carbonetos que no caso da perlita fina são os menores que de outras microestruturas, e não permitem que as discordâncias caminhem livremente por grandes extensões, sendo nesta microestrutura, imediatamente bloqueadas;
- 3.- Os tipos de desgaste a que estão sujeitas as rodas ferroviárias são por abrasão e por deslizamento. No desgaste por deslizamento os principais mecanismos de desgaste atuantes são: deformação plástica, fadiga de contato, fadiga termomecânica, microescorregamentos e macroescorregamentos com possíveis transformações de fase;
- 4.- Elementos químicos que estabilizam o carboneto lamelar da perlita atuam favoravelmente no desempenho do material. O mesmo ocorre com elementos que dissolvem na ferrita, endurecendo-a por solução sólida e ou por precipitação;
- 5.- Variáveis metalúrgicas como composição química, dureza, fração volumétrica de perlita e espaçamento entre carbonetos na microestrutura tem um efeito pronunciado no desempenho de materiais de rodas face às solicitações. Porém, cuidados devem ser tomados para que não se tenha precipitação de filmes de carbonetos em contornos de grão da perlita, o que ocorre quando o percentual de carbono atinge valores que em conjunto com outros elementos como Cr, Si, V, Mn propiciem formação de cementita livre, não combinada com a ferrita da perlita;

- 6.- Fatores operacionais como aplicações incorretas de freio levando a roda a escorregar travada sobre o trilho ou mesmo aquecendo-a demasiadamente como no caso da frenagem em que a sapata atua por um longo tempo sobre a roda, potencializa o desgaste face às combinações de deformação plástica e imputes térmicos com posteriores alterações microestruturais e acentuadas oxidações do material;
- 7.- Os escorregamentos relativos entre a roda e trilho, conhecidos como creepage tem uma influência significativa no comportamento e nas taxas de desgaste verificadas em materiais de rodas, tanto em ensaios em laboratório utilizando ensaios de desgaste disco-contra-disco bem como no campo;
- 8.- Ensaios de desgaste pino-contra-disco e disco-contra-disco tem sido usado com sucesso para prever o comportamento de materiais de rodas e trilhos bem como para desenvolvimento de novos materiais para este tipo de aplicação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Roda Ferroviária Fundida

4.1.1 Processo de Fabricação

Os materiais de rodas ensaiadas em laboratório e em campo foram produzidos por fundição em moldes de grafite utilizando o processo de vazamento conhecido por **fundição por baixa pressão**^[54], conforme descrito a seguir. Para elaboração do metal utilizou-se forno elétrico a arco trifásico e processo básico. Os moldes foram produzidos por usinagem à partir de blocos de grafite e receberam uma fina camada de tinta refratária que protege o grafite, evitando o contato deste com metal. Para alimentação, são utilizados massalotes revestidos com areia pelo processo “shell molding” ou moldagem em casca. O objetivo desse revestimento de areia no massalote é reduzir troca de calor. A operação de vazamento é feita em uma estação própria. A Figura 22^[55] ilustra o vazamento por baixa pressão. Uma panela ou cadinho revestido com refratário (1) contendo aço líquido (6) é colocada dentro de uma estação ou tanque (2), onde será processado o vazamento. Fecha-se o tanque com uma tampa (3) revestida com refratário (4) e dotada de um tubo cerâmico central (5) o qual servirá de duto para transferência do metal líquido da panela para o molde de grafite (7). A operação é iniciada pela introdução de ar comprimido (8) com pressão controlada no tanque (2), que provoca o fluxo ascendente do aço líquido através do tubo para dentro do molde de grafite. Esta operação é inteiramente automática. A altura do aço líquido no interior do molde durante o enchimento é controlada por um dispositivo composto por uma sonda posicionada dentro de um dos massalotes. No momento em que o aço líquido toca esta sonda, o vazamento é

interrompido. Alguns minutos após o vazamento, o molde superior é aberto e a roda desmoldada, sendo então colocada num túnel para resfriamento controlado até a temperatura de corte dos massalotes, feito pelo processo oxi-gás (acetileno ou GLP). Após o corte de massalotes, as rodas são tratadas termicamente. O tratamento térmico consiste em austenitização em temperatura adequada ao material, seguido do resfriamento brusco, com água, somente na pista de rolamento objetivando criar estado de tensões compressivas na peça e imediatamente revenimento para alívio de tensões.

Após tratadas termicamente, as rodas são jateadas com granalha, acabadas e jateadas novamente. Na segunda operação de jateamento é feito o “shot peening” visando aumentar as tensões residuais compressivas. A seguir, as rodas são acabadas e inspecionadas por partícula magnética e ultra-som conforme recomendações da AAR -M 208/107^[7]. A seguir seu cubo é usinado para as medidas finais de montagem e são efetuados controles dimensionais, tais como medidas de tape que é a medida do perímetro da roda na região onde teoricamente haverá o contato roda trilho, dimensões do cubo, friso dentre outras.

Para analisar a eficiência do tratamento térmico, são feitos ensaios destrutivos por corte de serra e ensaios físicos (dureza e resistência à tração), dentro de frequências pré-estabelecidas. O ensaio por corte de serra consiste em tirar uma fatia da roda e medir qual foi o fechamento segundo uma referência inicial marcada na região do corte. Quanto maior o fechamento, maior o valor da tensão residual compressiva em que se encontra. Após serradas, é levantado o perfil de dureza interna e são realizados ensaios de tração e exame metalográfico.

Figura 22. Ilustração do vazamento de rodas ferroviárias em molde de grafite pelo processo por baixa pressão^[55].

4.1.1.1 Microestruturas Típicas de Rodas Ferroviárias

A roda apresenta microestrutura predominantemente perlítica obtida por processo de normalização descrito. Porém, com uma fina camada de bainita de aproximadamente 4 mm na pista de rolamento devido ao resfriamento com água para obtenção de tensão de compressão. As Figuras 23, 24 e 25 mostram microestruturas típicas de roda de aço AAR classe C, sendo a Figura 25 obtida por microscopia eletrônica de varredura.

Figura 23. Microestrutura da roda próxima a superfície de rolamento. Presença maciça de bainita. Aumento 1000x. Ataque nital 1%.

Figura 24. Microestrutura da roda na região de transição bainita-perlita fina. Aumento 1000x. Ataque nital 1%.

Figura 25. Microestrutura predominante da roda. Perlita fina e ferrita alotriomorfa. Obtida por microscopia eletrônica de varredura.

4.2 Amostras para ensaio de desgaste em laboratório

Para os ensaios de desgaste em laboratório, empregou-se o mesmo material de rodas produzidas industrialmente. A Tabela 7 descreve as composições químicas e dureza dos materiais ensaiados da roda e trilho analisados a partir de amostras retiradas da pista de rolamento da roda e do boleto do trilho conforme Figura 26.

O material da roda atende a especificação ARR M-208^[7] para rodas fundidas classe B e C (fundidas em moldes de grafite) modificadas com Cr e ou Cr-V. O trilho é um aço laminado com pequena adição de Nb.

Tabela 7 - Composição Química dos Materiais Ensaçados

Material	C	Mn	Si	Cr	P	S	Nb	Al	V	Dureza
Roda	0,67	0,82	0,47	0,22	0,018	0,008	---	0,015	---	343 BHN
Trilho	0,77	1,30	0,77	---	0,022	0,019	0,04	0,010	---	291 BHN
Aço Cr -V	0,70	0,66	0,53	0,26	0,017	0,008	---	0,014	0,11	363 BHN

Figura 26. Local de retirada das amostras para análise química e ensaios de desgaste de rodas (a) e trilhos (b).

4.3 Métodos Experimentais

4.3.1 Ensaios de desgaste

Os ensaios de desgaste disco-contra-disco foram realizados no Laboratório do Agrupamento Ferroviário da Divisão de Tecnologia de Transportes do Instituto de Pesquisas Tecnológica do Estado de São Paulo. Procurou-se reproduzir condições próximas às utilizadas pela Companhia Vale do Rio Doce em vagões de minério GDT da Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD.

4.3.1.1 Determinação dos parâmetros do ensaio

Para determinação dos parâmetros do ensaio e dimensões dos corpos-de-prova calculou-se, utilizando a mecânica do contato de Hertz as tensões atuantes e a geometria do contato no tribossistema roda-trilho dos vagões GDT da CVRD - EFC carregados com 120 toneladas bruto, o que nos dá 15 t/roda. O modelo utilizado para os cálculos foi o proposto por SEELY & SMITH^[56] que mostra que duas superfícies curvilíneas em contato sob carga em ângulos diferentes de 180°, a geometria do contato é uma elipse. Essa situação é exatamente a que ocorre no tribossistema roda-trilho. Os valores de tensão máxima no contato ($\sigma_{\text{máx}}$), tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{\text{máx}}$) e profundidade à partir do ponto de contato em que ocorre a máxima tensão de cisalhamento são calculados no Anexo I.

Os valores reais da carga, geometria do contato e dimensões da elipse de contato reais foram obtidos através de levantamentos na via férrea e na oficina de vagões da Superintendência da Estrada de Ferro Carajás -EFC.

Para o determinação das cargas aplicadas no sistema roda-trilho utilizou-se um rodeiro instrumentado desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT conforme descrito por FERREIRA^[17]. Este equipamento consiste de um rodeiro com extensômetros elétricos distribuídos radialmente em cada roda e sistemas de condicionamento, transmissão, aquisição e tratamento de sinais. A Figura 27^[17] ilustra o rodeiro.

Figura 27. Rodeiro instrumentado utilizado para medição de esforços que atuam sobre a roda^[17].

Outro procedimento utilizado para se determinar a carga sobre a roda e a geometria do contato foi o sugerido e utilizado por GALLERIA^[40] para verificação da área de contato real de rodas para diferentes cargas. O procedimento consiste erguer o vagão e apoiá-lo novamente sobre o trilho colocando em baixo de cada roda um papel do tipo carbono entre duas cartolinas. A impressão do carbono ficará sobre a cartolina inferior.

A Figura 28 ilustra a área de contato medida na oficina de vagões da Superintendência da Ferrovia de Carajás da CVRD. Para este levantamento em campo selecionou-se um vagão GDT carregado de minério com peso bruto de 132,43 toneladas, que apresentava um rodeiro em boas condições, ou seja, sem falhas na pista de rolamento. Em seguida transportou-se este vagão até a oficina onde se fez a medição.

Figura 28. Elipse de contato medida na Estrada de Ferro Carajás - EFC- CVRD.

Para a determinação das dimensões e parâmetros do ensaio inicialmente utilizou-se o modelo proposto por HIRAKAWA et al ^[9] e calculou-se as tensões de contato conforme a mecânica de HERTZ. A fórmula para cálculo da máxima tensão de contato segundo critério Hertziano de deformação elástica é dada por TIMOSHENKO & GOODIER, conforme GARNHAN & BEYNON ^[14] é:

$$P_o = - 0,418 \times (L \times E / B \times R)$$

Equação 8

Sendo,

P_o - tensão máxima no contato.

L - carga normal

E - módulo de elasticidade

B - largura transversal do contato

R é dado por $1/R = 1/R_R + 1/R_T$ sendo R_R e R_T os raios dos corpos de prova da roda e do trilho respectivamente.

Dimensões e parâmetros propostos por HIRAKAWA et al^[9] :

Dimensões dos corpos-de-prova

Discos com 30 mm de diâmetro e 8 mm de largura.

Carga = 780 N

Cálculo das tensões:

$$P_o = -0,418 \times [(780 \times 2 \times 10^{11}) / (0,008 \times 0,0075)]^{0,5} =$$

$$P_o = - 6,74 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Os valores calculados para CVRD - EFC foram de $- 1,365 \times 10^9$ Pa, obtidos no Anexo I, logo aproximadamente o dobro do verificado por HIRAKAWA et al^[9]. Propõe-se então os corpos-de-prova conforme Figura 29.

Trabalhou-se com escorregamento entre os corpos-de-prova 8% na primeira etapa de testes e 3% de escorregamento na segunda etapa. Este escorregamento representa fisicamente a diferença de velocidade tangencial entre os corpos-de-prova. Para 8% de escorregamento as dimensões dos corpos de prova são mostradas na Figura 29 (a) e para ensaios com 3% de escorregamento as dimensões dos corpos-de-prova são mostradas na Figura 29 (b).

Figura 29. Desenho dos corpos-de-prova. (a) 8% de escorregamento (b) 3% de escorregamento (Dimensões em milímetro).

As variações nos diâmetros dos corpos-de-prova definem os escorregamentos iniciais utilizados no ensaio. Uma vez que os materiais apresentam características diferentes tais como dureza, composição química e processos de fabricação, no caso da roda fundida e do trilho laminado, o escorregamento varia à medida que o ensaio se desenvolve visto que o desgaste dos materiais é diferente. Porém, essas variações não foram levadas em conta no ensaio.

Cálculo das tensões de contato para as condições propostas :

$$P_o = -0,418 \times [(780 \times 2 \times 10^{11}) / (0,004 \times 0,00758)]^{0,5} = -9,5 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Os valores de $-9,5 \times 10^8$ Pa são aproximadamente 50% menor que os valores teóricos calculados para as condições da CVRD - EFC em vagões de minério GDT carregados com 15 t/roda, como pode ser verificado no Anexo1. Porém, considerando os altos níveis de escorregamento que seriam empregados ao longo de todo ensaio, considerou-se este valor, $-9,5 \times 10^8$ Pa, satisfatório. Desta forma, iniciou-se os ensaios com 780 N de carga aplicada entre os corpos-de-prova. Porém, mesmo assim, os primeiros ensaios apresentaram taxas de desgaste muito elevadas. Optou-se então, por reduzir a carga e manter o escorregamento de 8 % na primeira fase e 3 % na segunda fase, variando a carga de 294 a 588 MPa.

4.3.1.2 Descrição e equipamentos de ensaio de desgaste e microdureza

O ensaio de desgaste foi realizado em uma máquina AMSLER A135 para ensaio de desgaste disco-contra-disco conforme ilustrado na Figura 30.

Os corpos-de-prova são rolos (discos) deslizantes conforme dimensões mostradas na Figura 29 (página 65). Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, pressão atmosférica, contato a seco ou seja sem lubrificação, velocidade de giro dos dois eixos dos discos de 200 rotações por minuto e escorregamento de 8 % e 3 %. Como descrito, este escorregamento representa a diferença de velocidade tangencial entre os corpos-de-prova. Como os corpos-de-prova giram com uma mesma rotação por minuto diferenças no diâmetro irão gerar diferenças na velocidade tangencial e, conseqüentemente, escorregamento entre eles. A Figura 31 mostra esquematicamente o ensaio. O ciclo total de ensaio foi de 10^5 revoluções. O desgaste foi medido por perda de massa, sendo a pesagem feita em balança com precisão de 10^{-4} gramas. As pesagens foram feitas

seguindo intervalos previamente determinados. Antes da pesagem, os corpos-de-prova eram lavados durante 5 minutos em álcool utilizando aparelho vibrador ultra-sônico com objetivo de eliminar possíveis contaminações com impurezas que não faziam parte do tribossistema constituído pelos corpos-de-prova na ocasião do ensaio. As cargas variaram de 294 a 588 MPa. Esta carga é aplicada na máquina através de um dispositivo com mola e regulagem manual por régua graduada. Antes do ensaio o equipamento foi devidamente aferido pela Divisão de Engenharia Mecânica do Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo.

Para ensaios de microdureza utilizou-se um nanodurômetro de indentação dinâmica da marca Fischer, modelo HV100, carga de 10 gramas Laboratório de Fenômenos de Superfície do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo conforme ilustrado na Figura 32. O objetivo do ensaio de microdureza foi verificar a presença de encruamento e avaliar até que profundidade o material encruou, à partir da superfície de desgaste.

4.3.2 Caracterização microestrutural e do desgaste.

Os ensaios metalográficos foram feitos em microscópio óptico da marca Olympus modelo BX60M do Laboratório de Fenômenos de Superfície do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP e em microscópio eletrônico de varredura modelo Leica Stereoscan 440 do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP. Para caracterização das partículas de desgaste e pós formados durante o ensaio utilizou-se um Difrátômetro de raios-X, marca Philips, modelo MPD 1880 do LCT - EPUSP.

Figura 30. Máquina AMSLER A135 para ensaio de desgaste.

Figura 31. Desenho esquemático do ensaio.

Figura 32. Nanodurômetro de indentação dinâmica do Laboratório de Fenômenos de Superfície da EPUSP.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaios em laboratório com aços AAR classe C modificados com Cromo descritos na Tabela 7

5.1.1 Ensaios com 8% de escorregamento

Trabalhou-se inicialmente com escorregamento de 8% pois entendeu-se ser esta uma condição extrema da que ocorre em ferrovias com muitas curvas como no caso da MRS Logística SA^[64] e, em condições de frenagem com cargas elevadas sobre o eixo, como no caso da Estrada de Ferro Carajás - EFC-CVRD^[17].

5.1.1.1 Perdas de massa e taxas de desgaste

A Tabela 8 mostra os resultados de perda de massa em função do número de revoluções para diferentes cargas e escorregamento inicial de 8%, obtidas no ensaio de desgaste disco-contra-disco de corpos-de-provas de materiais ensaiados.

As Figuras 33 e 34 representam graficamente as perdas de massa vs número de revoluções para materiais de roda e trilho ensaiados com diferentes cargas e escorregamento inicial de 8% conforme listadas na tabela 8.

A Figura 35 compara os resultados do ensaio de desgaste para carga de 588 MPa do material de roda e trilho.

Tabela 8 - Resultados da perda de massa para diferentes cargas x número de revoluções.

Revoluções	Carga (MPa), 8%escorregamento							
	294 MPa		392 MPa		490 MPa		588 MPa	
	Trilho	Roda	Trilho	Roda	Trilho	Roda	Trilho	Roda
10000	0,0315	0,0223	0,0564	0,0328	0,0597	0,0586	0,0648	0,0831
40000	0,0826	0,0759	0,2169	0,1286	0,1724	0,1445	0,1907	0,1758
70000	0,2931	0,1704	0,2937	0,1537	0,3054	0,2274	0,3762	0,2998
100000	0,2951	0,2268	0,442	0,2357	0,4697	0,3226	0,616	0,4784

Figura 33. Perda de massa vs. número de revoluções para o material do trilho.

Figura 34. Perda de massa vs. número de revoluções para o material da roda.

Figura 35. Perda de massa vs. número de revoluções para o material da roda e trilho.

Pelas figuras 33 e 34 e 35 verifica-se que:

- a) a perda de massa aumenta com o número de revoluções ;
- b) o material da roda apresenta um desgaste menor que o material do trilho. Tal fato é decorrente da maior dureza do material da roda em relação ao trilho, como mostrado na Tabela 7. Este efeito da dureza é freqüente na literatura de desgaste, tendo sido relatado pela primeira vez por ARCHARD^[16] que descreve, como mostrado na Equação 6 (página 45), que a taxa de desgaste varia inversamente com a dureza do material;
- c) para um mesmo número de revoluções a perda de massa aumenta com a carga, exceto para a roda com 70.000 revoluções e trilho com 40.000 revoluções. Nestes casos aconteceram inversões, ou seja, cargas maiores apresentaram menores perdas de massa que cargas menores. Estas variações podem ser decorrentes de presença de flocos de material metálico ou óxido que se formaram e se destacaram de um dos corpos devido aos mecanismos de desgaste atuantes durante o ensaio e ficaram aderidos na superfície do

corpo-de-prova do trilho. GARNHAM & BEYNON^[14,61] em estudo comparativo de aços bainíticos e perlíticos para trilhos, relataram a presença de flocos de partículas de desgaste que se formam durante o ensaio, em máquina AMSLER, e o achatamento da superfície do corpo-de-prova devido a forma de aplicação da carga^[61]. Como os corpos-de-prova durante o ensaio sofrem vibrações devido ao efeito das molas por onde são aplicadas as cargas, essas vibrações geram pequenas cargas de impacto, que muitas das vezes comprimem sobre a superfície de um dos corpos produto do desgaste como material metálico ou óxido.

A Figura 36 mostra a variação da taxa de desgaste obtida no ensaio com 8% de escorregamento (calculada em miligramas por metro de ensaio) em função da distância percorrida no ensaio. Verifica-se que a taxa de desgaste aumenta com a carga. Após percorrido aproximadamente 4000 m de ensaio, a taxa de desgaste para uma dada carga permanece praticamente constante, para todas as cargas investigadas. Isso indica que a partir de 4000 m atingiu-se o regime permanente, no qual a relação perda de massa/comprimento percorrido no ensaio tornou-se constante, para todas as cargas investigadas.

O valores do coeficiente de desgaste k foram calculados utilizando o modelo proposto por ARCHARD^[16] descrito na Equação 5 (página 45) para a condição de taxas de desgaste constantes ou regime permanente, para cargas de 294 e 588 MPa. E, para ambas as cargas investigadas o valor encontrado foi $k = 4 \times 10^{-4} \text{ mg/mm}^3$.

Figura 36. Taxa de desgaste (mg/m) vs. distância (m) para 8% de escorregamento.

As Figuras 37 e 38 mostram as seções longitudinais e transversais dos corpos de prova da roda ensaiado com carga de 588 MPa. Pelas figuras 37 e 38 , verifica-se:

- a) intensa deformação plástica no sentido do movimento;
- b) intensa deformação plástica no sentido transversal ao movimento;
- c) sulcos de abrasão e presença de partículas aderidas à superfície.

Um dos mecanismos de desgaste atuante envolve a deformação plástica do corpo e contra-corpo. A medida que esta deformação aumenta, pode ocorrer destacamento de partículas metálicas relativamente grandes. Na Figura 39, na região indicada pela seta observa-se o destacamento de uma partícula de aproximadamente 100 μm (588 MPa, 100000 revoluções e 8% de escorregamento).

Figura 37. Seção longitudinal do corpo-de-prova da roda ensaiado com carga de 588 MPa, 100.000 rev. Ataque nital 1%.

Figura 38. Seção transversal do corpo-de-prova da roda ensaiado com carga de 588 MPa, 100.000 rev. Ataque nital 1%.

Essas partículas de desgaste podem ter se destacado do corpo ou do contra-corpo mas, se mantiveram presas a um dos dois na ocasião da pesagem devido a compressão do ensaio. Por outro lado, partículas semelhantes podem se destacar na limpeza que antecede à pesagem acentuando as variações de perda de massa a cada intervalo. As dimensões

das partículas de desgaste e seu caráter metálico estão relacionadas com os parâmetros do ensaio e ocorrem mais acentuadamente em ensaios realizados com cargas ou velocidades elevadas levando o material a um desgaste severo, caracterizado por deformação plástica devido ao contato entre as asperezas do corpo e contra-corpo ou por delaminação, caracterizado por nucleação e crescimento de trincas sub-superficiais ^[16,59]. Essas trincas tem como origem o acúmulo de discordâncias geradas no processo de deformação plástica das asperezas, sendo que as discordâncias se posicionam em camadas sub-superficiais encruando-as ^[57]. Agravado ao fato, nessas regiões sub-superficiais teremos um aumento na tensão de cisalhamento conforme a mecânica de contato de Hertz. Com a seqüência de revoluções as trincas se formam paralelas à superfície de desgaste e posteriormente se propagam para superfície gerando uma partícula lamelar de desgaste ^[16].

Figura 39. Seção transversal do corpo-de-prova da roda apresentando formação de partículas desgaste. Ataque nital 1%. (588 MPa, 10^5 rev. e 8% de escorregamento).

A Figura 40, obtida através de microscopia eletrônica de varredura, ilustra uma trinca paralela à superfície de desgaste na seção longitudinal do corpo-de-prova da roda após 10^5 revoluções e carga de 588 MPa.

Figura 40. Trinca paralela à superfície de desgaste na seção longitudinal do corpo-de-prova da roda após 10^5 revoluções e carga de 588 MPa.

Durante o ensaio, concomitante com a formação de partículas metálicas de desgaste, notou-se a formação de óxidos sendo portanto a oxidação um outro mecanismo de desgaste. Notou-se também um aumento da temperatura dos corpos-de-prova, porém não foi feita medição da temperatura atingida durante o ensaio. O aumento da temperatura, como já descrito, reduz as propriedades mecânicas diminuindo assim a resistência à fadiga e, associado à deformação plástica, pode causar mudanças na microestrutura uma vez que deformação plástica antes ou durante o aquecimento tem significativo efeito sobre os mecanismos e a cinética de esferoidização da perlita^[18,19]. Este aumento de temperatura

tende a agir como um acelerador do processo de formação de partículas de desgaste e óxidos.

Outro mecanismo de desgaste atuante é a abrasão. A Figura 41 mostra a seção transversal do corpo-de-prova da roda após 10^5 revoluções com carga de 588 MPa. Verifica-se a ocorrência de abrasão. Esta abrasão pode ser atribuída à ação de óxidos e ou de partículas encruadas do metal da roda ou do trilho que se formou conforme mecanismos descritos anteriormente, podendo portanto ser a dois e ou a três corpos.

Figura 41. Seção transversal do corpo-de-prova da roda 10^5 revoluções, 8% de escorregamento e carga de 588 Mpa.

Na Figura 41, na região indicada pela seta, verifica-se ainda a nucleação de trincas à partir de uma camada branca. Esta camada branca pode sugerir a formação de martensita durante o ensaio. Mecanismo semelhante a este é o de formação do **Spalling** nas rodas como já descrito na seção 3.2.2.4.

5.1.1.2 Microdureza após o decorrer do ensaio

A Figura 42 mostra a variação da dureza em função da distância da superfície ensaiada (média de três pontos) para cargas de 294 e 588 MPa e escorregamento de 8% para material da roda. Os valores máximos de dureza foram verificados à 30 μm da borda, ficando acima de 700 HV para todos os casos. O mesmo ocorreu com o metal do trilho. O comportamento foi bastante semelhante para as cargas investigadas.

Figura 42. Variação da dureza a partir da borda de desgaste (8% escorregamento).

Na Figura 42 (a) verifica-se durezas com valores de 950 a 1035 HV. Estas medidas se referem a região que apresentou camada branca como mostrado na Figura 41. Os valores de dureza podem ser um indicativo da formação de martensita durante o ensaio.

5.1.2 Ensaio com 3% de escorregamento

5.1.2.1 Perdas de massa e taxas de desgaste

A Tabela 9 apresenta os valores obtidos no ensaio de desgaste de perda de massa vs. número de revoluções para cargas de 294 e 588 MPa.

Tabela 9 - Perda de massa para diferentes números de revoluções para cargas de 294 e 588 MPa e escorregamento de 3%

Carga (MPa), 3 % de escorregamento				
Revoluções	294 MPa		588MPa	
	Trilho	Roda	Trilho	Roda
1000	0,0003	-0,0004	0,0002	0,0004
10000	0,0007	0,0005	0,0281	0,0281
40000	0,035	0,0451	0,1447	0,1368
70000	0,1476	0,1129	0,2588	0,212
100000	0,1905	0,1518	0,435	0,4148

As Figuras 43, 44 e 45 representam graficamente a perda de massa (g) vs. o número de revoluções para materiais de rodas e trilho ensaiados com cargas de 294 e 588 MPa e escorregamento de 3% conforme listados na Tabela 9.

Figura 43. Perda de massa vs. número de revoluções para cargas de 294 MPa e escorregamento de 3% de materiais de roda e trilho.

Figura 44. Perda de massa vs. número de revoluções para cargas de 588 MPa e escorregamento de 3% de materiais de roda e trilho.

Figura 45. Perda de massa vs. número de revoluções para cargas de 294 e 588 MPa e escorregamento de 3% de materiais de roda.

Pelas Figuras 43, 44 e 45 verifica-se que o comportamento do desgaste com 3% acompanha o descrito para 8% de escorregamento, ou seja:

- a) a perda de massa aumenta com o número de revoluções;
- b) a perda de massa aumenta com a carga;
- c) o desgaste do material do trilho é superior ao da roda.

Para carga de 294 MPa após 1.000 revoluções, o material da roda apresentou um desgaste positivo, ou seja, houve um aumento da massa da roda. Isto possivelmente se deve a partículas presentes ou geradas no tribossistema formado para as condições do ensaio e que de alguma forma se incorporaram a massa do corpo-de-prova do material da roda na ocasião da pesagem. Quando as partículas não ficavam aderidas à superfície dos corpos-de-prova, as mesmas se desprendiam e caíam. Essas partículas e óxidos foram cuidadosamente recolhidas evitando contaminação, e posteriormente caracterizadas.

A Figura 46 mostra a taxa de desgaste, avaliada por perda de massa (mg) pela distância percorrida (m). Pela Figura 46 verifica-se que a taxa de desgaste está variando ao longo de todo o ensaio e não se atingiu o regime permanente. Desta forma, achou-se conveniente não se calcular o coeficiente de desgaste k . O ensaio não foi levado adiante pois se adotou os mesmos critérios adotados no ensaio com 8% de escorregamento.

Figura 46. Taxa de desgaste, avaliada por perda de massa (mg) vs. distância percorrida no ensaio (m).

5.1.2.1.1 Comparação entre os resultados obtidos no ensaio com 3% e 8% de escorregamento

A Figura 47 compara os resultados do ensaio de desgaste para cargas de 294 e 588 MPa e escorregamento de 3% e 8%. Verifica-se que o desgaste aumenta com o aumento do escorregamento para ambas as cargas investigadas. Para cargas de 294 MPa a influência do escorregamento aumenta com o aumento do número de revoluções. Para cargas de 588 MPa a diferença de comportamento se manteve praticamente constante ao

longo de todo ensaio. Nota-se também que a influência da carga é maior que a do escorregamento no desgaste, avaliado por perda de massa.

Figura 47. Perda de massa (g) da roda vs. número de revoluções para cargas de 294 e 588 MPa e escorregamento de 3% e 8%.

5.1.2.2 Mecanismos de desgaste

As Figuras 48 e 49, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, ilustram a seção longitudinal e transversal ao sentido do movimento de corpos de prova ensaiados com carga de 588 MPa e escorregamento de 3%. Verifica-se que os mecanismos de desgaste são os mesmos já descritos para 8% de escorregamento, ou seja :

- intensa deformação plástica nos sentidos longitudinal e transversal ao movimento;
- abrasão a dois e ou três corpos ;
- formação de trincas, oxidação e destacamento de partículas de desgaste e óxidos.

Figura 48. Seção longitudinal de corpos de prova ensaiados com carga de 588 MPa e 3% de escorregamento após 10^5 revoluções.

Figura 49. Seção transversal de corpos de prova ensaiados com carga de 588 MPa e 3% de escorregamento após 10^5 revoluções.

5.1.2.2.1 Análise das partículas de desgaste e óxidos geradas no ensaio com 3% de escorregamento

Objetivando analisar e caracterizar as partículas, produto do desgaste, geradas durante o ensaio com 3% de escorregamento, foram feitas análises por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X.

As Figuras 50, 51, 52 e 53 mostram as formas das partículas de desgaste formadas durante ensaio e que se desprenderam dos corpos de prova para cargas de 294 e 588 MPa.

Figura 50. Forma das partículas de desgaste -588 MPa, 70000 e 100000 revoluções.

A Figura 50 mostra a forma das partículas para carga de 588 MPa após 70.000 revoluções e 100.000 revoluções. Não se nota grandes variações na forma e no tamanho das partículas em função do número de ciclos. Verifica-se ainda algumas áreas brilhantes dispersas aleatoriamente nas partículas.

A Figura 51 mostra a forma das partículas para carga de 294 MPa após 70.000 revoluções e 100.000 revoluções. Também não se nota nenhuma variação sensível na forma e no tamanho das partículas em função do número de ciclos e, como no caso anterior, nota-se áreas brilhantes nas partículas.

Figura 51. Forma das partículas de desgaste - 294 MPa, 700000 e 100000 revoluções.

A Figura 52 compara partículas geradas após 10^5 revoluções para cargas de 294 e 588 MPa. Nota-se uma diferença nas dimensões e formas das partículas. As partículas geradas nos ensaios com cargas de 588 MPa parecem maiores que as geradas por cargas de 294 MPa. Isto pode estar relacionado às maiores deformações causadas por cargas maiores. Desta forma, a densidade de discordâncias geradas no processo de deformação plástica das asperezas será maior para maiores cargas, e, possivelmente se concentrarão em camadas mais distantes da superfície, sendo que após nucleação e crescimento da trinca, como na Figura 40 (página 77), teria formação de partículas de desgaste maiores.

Figura 52. Comparação entre partículas de desgaste formadas com cargas de 294 e 588 MPa .

Figura 53. Comparação entre partículas de desgaste formadas. Cargas 294 e 588 MPa.

A Figura 53 também compara partículas de desgaste para as cargas de 294 e 588 MPa, e, verifica-se também as diferenças de geometria, sendo as formadas para cargas de 588 MPa maiores que as formadas para cargas de 294 MPa. Em ambos os casos nota-

se ainda partículas bem pequenas, menores que $30\mu\text{m}$ que parecem ser geradas a partir da quebra de partículas maiores.

A Figura 54 mostra o resultado da análise por microsonda do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP. Verifica que as áreas brilhantes localizadas nas partículas de desgaste são ferro metálico e o restante das partículas são constituídas de óxido de ferro.

Figura 54. Resultado da análise por microsonda da partícula de desgaste.

Para a caracterização do tipo de óxido formado durante o ensaio utilizou-se o método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios-X. Os resultados mostraram que a partícula contém hematita (Fe_2O_3) e ferro. As análises foram realizadas em pó gerado após 70.000 revoluções e carga de 588 MPa e pó gerado após 100.000 revoluções carga de 294 MPa, e para ambas as análises os resultados se mantiveram.

5.1.2.2.2 Encruamento

Objetivando avaliar o encruamento, alguns corpos de prova foram ensaiados somente até 1.000 revoluções para as duas cargas investigadas. A Figura 55, obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostra a seção longitudinal de um corpo-de-prova ensaiado com carga de 588 MPa e 3% de escorregamento após 1.000 revoluções. Mesmo para um pequeno número de revoluções, já se verifica deformação plástica e dobramento de material bem como destacamento de pequenas partículas. Nas regiões indicadas pelas setas pode-se verificar uma partícula destacada e uma cavidade na superfície de desgaste do corpo-de-prova.

Figura 55. Seção longitudinal de corpo de prova ensaiado a 588 MPa escorregamento de 3% após 1000 revoluções.

5.1.2.3 Microdureza

A Figura 56 mostra a variação da dureza em função da distância da superfície ensaiada (média de três pontos) para cargas de 294 e 588 MPa e escorregamento de 3% após 10^5 revoluções. Mediu-se a dureza a cada 10 μm a partir da borda ensaiada.

Figura 56. Variação da dureza em função da distância da superfície ensaiada para cargas de 294 MPa e 588 MPa e 3% de escorregamento.

Verifica-se que os valores de dureza próximos à superfície ensaiada estão acima de 800 HV e que a uma distância de 30 μm da borda, ficam na faixa de 700 HV, caindo para maiores distâncias da borda para valores próximos à 400 HV. Os valores obtidos para carga de 588 MPa não se diferenciam dos valores obtidos para carga de 294 MPa. Também não se vê variações em relação aos resultados obtidos para ensaios com 8% de escorregamento descritos anteriormente.

A Figura 57 mostra a variação da dureza em função da distância da superfície

ensaiada para carga de 588 MPa e escorregamento de 3% após 1.000 revoluções. Verifica-se que a variação da dureza da borda ensaiada para o centro da amostra foi pequena, porém representativa para o número de revoluções avaliado.

Figura 57. Variação da dureza em função da distância da superfície ensaiada para carga de 588 MPa e escorregamento de 3%.

5.2 Comparação dos Mecanismos de Desgaste obtidos em ensaio de desgaste com os verificados em rodas em serviço

Como descritos anteriormente, o desgaste de rodas ferroviárias pode ser classificado :

- 1.- Desgaste por abrasão a dois e ou a três corpos.
- 2.- Desgaste por deslizamento com mecanismos diversos atuando, tais como:
 - fadiga de contato, fadiga termomecânica e fadiga térmica
 - micro e macroescorregamentos.
 - deformação plástica.
- 3.- Desgaste Oxidativo

A forma e os mecanismos de desgaste que irão atuar no par roda-trilho estão diretamente relacionados ao tribossistema e dele fazem parte o tipo de carga que é transportada, as tensões que atuam sobre o sistema roda-trilho-sapata de freio, os materiais da roda, trilho e sapata, o tipo de truque em que é montado o rodeiro, bem como o tipo de sistema de freio do truque; as características da via permanente, tais como: condições climáticas, topografia, bitola da via permanente, raios de curva, dimensões do trilho, e ainda, as condições operacionais, tais como: velocidade de trajeto, tempos de aplicação de freios dentre outros. Todo esse conjunto de fatores irão determinar a forma e os mecanismos de desgaste que atuarão no par roda-trilho.

Os tipos de desgaste que serão ilustrados à seguir são os verificados em duas das mais importantes ferrovias brasileiras, sendo elas a Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD e a Ferrovia da MRS Logística SA, cujos principais produtos transportados por ambas são minério de ferro. A Ferrovia da MRS caracteriza-se por ser uma ferrovia que transporta elevadas cargas por eixo (**15t/eixo**) e, devido sua topografia, apresentar muitas curvas e serras onde são necessárias aplicações de fortes e prolongadas cargas térmicas na frenagem ^[64], enquanto que a Estrada de Ferro Carajás se caracteriza por elevadas cargas por eixo (**acima de 15t/eixo**) e por apresentar poucas curvas e pequenas rampas ^[17]. Ambas ferrovias operam com vagão GDT sendo que a MRS utiliza rodas de 914mm (**36"**) de diâmetro e a EFC utiliza rodas de 965mm (**38"**) de diâmetro. As avaliações dos desgastes foram feitas à partir de análises em campo e de ensaios em laboratório em amostras cedidas por estas ferrovias.

5.2.1 Condições de desgaste normal

As Figuras 58 e 59 mostram as seções transversais e longitudinais de corpos-de-prova retirados à partir de rolamento de uma roda de 965 mm de diâmetro (38 polegadas) de um vagão GDT para transporte de minério da Companhia Vale do Rio Doce, Estrada de Ferro Carajas. Nesta região, esta roda apresentou desgaste sem formação ou presença de trincas de fadiga de contato (Escamação).

Figura 58. Seção transversal ao sentido do movimento de uma roda CD38 da Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD.

Pela Figura 58 verifica-se presença de sulco de aproximadamente 20 μm de profundidade, gerado por abrasão e ainda intensa deformação plástica no sentido transversal ao movimento.

Figura 59. Seção longitudinal ao sentido do movimento de uma roda CD38 da Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD.

Pela Figura 59, verifica-se intensa deformação plástica no sentido do movimento e formação de uma partícula de desgaste de aproximadamente 300 μm. Nota-se que esta partícula está fortemente encruada, e possivelmente numa operação de frenagem posterior poderia-se depositar sobre a sapata de freio vindo mais tarde a atuar como uma ferramenta de corte face à sua elevada dureza (acima de 800 HV como já visto anteriormente), desgastando assim a superfície da roda.

5.2.2 Escamação ou “Shelling”

A Figura 60 mostra a pista de rolamento de uma roda nos estágios iniciais de formação da escamação. Verifica-se que se formaram trincas paralelas na pista de rolamento da roda. Estas trincas se dão ao longo de toda pista de rolamento.

Figura 60. Trincas de fadiga de contato mostrando o início de formação da escamação em uma roda CD38 da Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD.

Figura 61. Seção longitudinal de corpo de prova retirado na região das trincas mostradas na Figura 60.

A Figura 61 mostra a seção longitudinal de um corpo-de-prova retirado na região das trincas mostradas na Figura 60. Observa-se que as trincas se propagam para dentro do material e seu ângulo de inclinação com a superfície varia com o grau de deformação do material ou seja quanto maior a intensidade da deformação, menor o ângulo. Nas regiões

indicadas com as setas verifica-se presença de escamas já formadas. Isto se deve a propagação e encontro de trincas. Como as trincas são paralelas, para que haja encontro de trincas é necessário que ocorra uma inversão na direção de uma das trincas. Esta inversão é facilitada pela presença de inclusões não metálicas. A Figura 62 mostra a região de uma outra trinca em que houve uma inversão de direção de propagação.

Figura 62. Trinca de fadiga de contato com inversão na direção de propagação.

Análise com microsonda no local de inversão de direção da trinca mostrou a presença de sulfetos. A Figura 63 ilustra uma inclusão de sulfeto posicionada à aproximadamente 20 μm do ponto de inversão de direção da trinca. Esta inclusão, devido sua característica plástica, deforma-se no sentido do movimento.

A Figura 64 mostra a variação da dureza a partir da pista de rolamento de um corpo-de-prova retirado próximo à região das trincas mostradas na Figura 63.

Figura 63. Inclusão de sulfeto posicionada próxima ao ponto de inversão de direção da trinca mostrada na Figura 62.

Figura 64. Variação da dureza da pista de rolamento para o centro da roda numa região próxima a indicada na Figura 60.

A Figura 65 mostra os vários estágios da formação e destacamento de escamas em

rodas de vagão de minério da Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD. Na Figura 65 (a) nota-se pequenas trincas que se propagam para o interior da peça e aumentando sua largura 65 (b) até que haja formação e desprendimento da escama e formação de crateras na pista de rolamento da roda 65 (c).

Figura 65. Estágios para formação de escamação em rodas na Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD.

5.2.3 Lascamento ou “Spalling”

Como descrito nas seções 3.2.2.3 e 3.2.2.4, quando uma roda escorrega travada sobre o trilho, devido a má operação de frenagem, a energia térmica gerada na região do contato pode alcançar valores próximos ou mesmo acima da zona crítica em que se atinge o campo austenítico do diagrama Ferro - Carbono. Estando o material nesta faixa de

temperatura, as deformações plásticas podem se tornar intensas o que pode gerar calo na pista ou friso da roda, e, dependendo da velocidade de resfriamento imposta pelo meio que circunda a região aquecida, pode-se ter localmente transformação martensítica com formação de uma microestrutura de elevada dureza e frágil. Além do caráter frágil da martensita, esta transformação de fase se dá com aumento de volume, que para aços de roda com carbono na faixa de 0,7% é aproximadamente da ordem de 4,29% ^[2]. Esta expansão irá gerar tensões trativas na região transformada e posteriormente trincas irão se formar no material frágil, martensita, que se propagam em ciclos posteriores, soltando lascas do material.

A Figura 66 e 67 mostram a pista de rolamento e o friso de uma roda de 914 mm (36") de diâmetro que escorregou travada devido a incorreta operação de frenagem sobre o trilho. Observa-se acúmulo de material deformado netas regiões característicos de formação de calo. Normalmente quando se observa o problema em uma das rodas do rodeiro o mesmo deve ter se desenvolvido na outra roda, visto que as duas são fixadas no mesmo eixo e quando ocorre o travamento, as duas escorregam simultaneamente.

Ensaio com líquido penetrante na região deformada mostrada na Figura 66 indicou presença de trincas como mostrado na Figura 68.

A Figura 69 mostra a região da pista de rolamento de uma roda de 965 mm (38") de diâmetro que escorregou travada devido a frenagem sobre o trilho na Estrada de Ferro Carajás EFC-CVRD com lascamento de material.

Figura 66. Região da pista de rolamento de uma roda que escorregou travada com presença de material deformado formando um calo.

Figura 67. Roda com deformação plástica e acúmulo de material deformado no friso devido ao travamento durante a frenagem.

Figura 68. Trincas na pista de rolamento de uma roda, conforme mostrado na Figura 66, que escorregou travada sobre o trilho, reveladas através de ensaio com líquido penetrante. Nota-se também fortes riscos de abrasão na parte inferior da pista.

Análise macrográfica utilizando solução de persulfato de amônia à 20% na região lascada apresentada na Figura 69 revelou presença de martensita, regiões escuras indicadas pela seta, próximo aos vazios deixados após as lascas se soltarem, como mostrado na Figura 70.

Análise metalográfica na região escura indicada pela seta na Figura 70 mostrou presença de martensita conforme ilustrado na Figura 71. Medidas de dureza realizada nesta região indicaram valores acima de 900 HV.

Figura 69. Região da pista de rolamento de uma roda que apresentou lascamento

Figura 70. Superfície de uma roda que sofreu escorregamento e transformação martensítica, revelada com persulfato de amônia a 20%.

Figura 71. Microestrutura encontrada na região lascada indicada na Figura 69.

Figura 72. Microestrutura verificada próximo à pista de rolamento da roda mostrada na Figura 69 em regiões distantes à região lascada.

Análise metalográfica em regiões distantes da região lascada, porém próxima à pista de rolamento mostrou uma microestrutura deformada devido ao uso, mas predominantemente perlítica com alguma ferrita livre como mostrado na Figura 72.

5.3 Desenvolvimento de material objetivando melhor desempenho em serviço.

Buscando materiais que propiciem melhor desempenho em campo foram desenvolvidos aços com adições de ligas, **Cr** e **V** conforme composição química mostrada na Tabela 7. O desenvolvimento constou de teste em laboratório de desgaste utilizando ensaio disco-contra-disco, produção de um lote de 64 rodas modelo CK36, aplicação das rodas em vagões de minério GDT da MBR-Minerações Brasileiras Reunidas SA e acompanhamento em campo do desgaste utilizando instrumentos específicos definidos pela AAR- M208/107 ^[7].

5.3.1 Ensaios de laboratório

Foram realizados ensaios de desgaste comparando aços com adição de Cromo e Vanádio com aços com adição de cromo conforme composições mostradas na Tabela 6. A Figura 73 mostra o resultado do ensaio de desgaste avaliado por perda de massa vs. número de revoluções de um aço com adição de **Cr-V** e compara com um normal estudado, somente com adição de **Cr**. O objetivo da adição de **V** é a estabilização do carboneto aumentando desta forma a resistência ao amolecimento bem como o endurecimento da ferrita integrante da perlita por solução sólida e o refino do grão através do aumento da temperatura da austenitização e da formação de precipitados semi-coerentes com a matriz ^[19,49,50,65].

Pela Figura 73 verifica-se o melhor desempenho em ensaio de desgaste do aço com adição de **Cr-V** em relação ao aço com adição somente de **Cr**.

Figura 73. Perda de massa (g) vs. Número de revoluções de um aço de roda com Cr-V e um aço com Cr.

5.3.2 Produção de rodas e ensaio em campo

Produção das rodas modelo CK 36 e aplicação das mesmas em vagões GDT para transporte de minério de ferro da MBR- Minerações Brasileiras Reunidas SA.

5.3.3 Acompanhamento em campo

As avaliações de desgaste em campo foram feitas utilizando calibres de medição de espessura de friso e perfilômetro. Na Ferrovia MRS Logística SA normalmente as rodas se desgastam na região do friso, afinando-o até o limite de condenação que faz com que a roda seja recolhida para reperfilamento. As principais formas de desgaste são por abrasão e por deslizamento, sendo que no desgaste por deslizamento os principais mecanismos de desgaste são microescorregamento e deformação plástica com acentuado escoamento. Estes mecanismos, como já descrito, estão diretamente relacionados ao tribossistema no qual fazem parte a topografia da região e a quantidade e raio de curvas da ferrovia. Na

Figura 74. Calibre de medição de friso conforme AAR - S - 618 - 77^[7]

Figura 75. Perfilômetro de lâminas.

A Tabela 10 mostra o resultado da medição da espessura do friso de 32 rodas produzidas em aço Cr-V utilizando o calibre AAR - S - 618 - 77 ^[7].

Tabela 10 - Espessuras de friso de rodas CK 36 em teste produzidas em aço AAR classe C com adição de Cr-V.

Início		06/08/1997		29/01/1999		
VAGÃO	Nº RODA	Data/entrada	Data/medida	FRISO/me	Nº VIAGENS	Km rodados
	62166	06/08/1997	29/01/1999	32,65	170	208,250
	62021	06/08/1997	29/01/1999	32,37	170	208,250
025/	57002	06/08/1997	29/01/1999	30,02	170	208,250
171-2	56931	06/08/1997	29/01/1999	33,53	170	208,250
	56968	06/08/1997	29/01/1999	32,89	170	208,250
	49607	06/08/1997	29/01/1999	28,8	170	208,250
	57004	06/08/1997	29/01/1999	32,82	170	208,250
	56972	06/08/1997	29/01/1999	32,05	170	208,250
	62020	06/08/1997	29/01/1999	33,72	170	208,250
	62165	06/08/1997	29/01/1999	32,9	170	208,250
025/	62114	06/08/1997	29/01/1999	32,14	170	208,250
170-4	62137	06/08/1997	29/01/1999	32,93	170	208,250
	56904	06/08/1997	29/01/1999	31,62	170	208,250
	56967	06/08/1997	29/01/1999	32,47	170	208,250
	49605	06/08/1997	29/01/1999	33,68	170	208,250
	56903	06/08/1997	29/01/1999	30,72	170	208,250
	62218	06/08/1997	29/01/1999	33,65	168	205,800
	57003	06/08/1997	29/01/1999	32,15	168	205,800
025/	57001	06/08/1997	29/01/1999	32,22	168	205,800
178-0	56966	06/08/1997	29/01/1999	33,42	168	205,800
	62025	06/08/1997	29/01/1999	29,73	168	205,800
	56906	06/08/1997	29/01/1999	32,09	168	205,800
	56900	06/08/1997	29/01/1999	33,16	168	205,800
	56930	06/08/1997	29/01/1999	34,01	168	205,800
	49608	06/08/1997	29/01/1999	32,87	168	205,800
	49609	06/08/1997	29/01/1999	33,47	168	205,800
025/	62219	06/08/1997	29/01/1999	31,01	168	205,800
179-8	62073	06/08/1997	29/01/1999	32,94	168	205,800
	62022	06/08/1997	29/01/1999	32,36	168	205,800
	57005	06/08/1997	29/01/1999	34,41	168	205,800
	62194	06/08/1997	29/01/1999	33,3	168	205,800
	62196	06/08/1997	29/01/1999	33,61	168	205,800

A Figura 76 mostra a variação da espessura do friso das 32 rodas avaliadas descritas na Tabela 10. Verifica-se duas linhas que representam a medida inicial do friso de 36,59 mm (média de 10 rodas novas) e a medida mínima de condenação, abaixo da qual a roda necessita ser reperfilada, de aproximadamente 23 mm.

Figura 76. Variação da espessura do friso das rodas em teste nos vagões GDT da MBR na ferrovia da malha regional sudeste MRS.

Figura 77. Perfil desgastado de 2 rodas CK36 em teste nos vagões GDT da MBR na Ferrovia da MRS.

A Figura 77 mostra o desgaste apresentado na região do friso e pista de rolamento de duas rodas em teste após 200.000 Km rodados. As linhas externas, indicadas como original, se referem ao perfil da mesma roda antes do uso. As internas, indicadas como desgastado, foram levantadas em campo após 200.00 Km. As medidas são orientativas, mas representam bem o comportamento de todo o lote.

A avaliação visual dos tipos de desgaste atuantes comprovaram ser a abrasão e o desgaste por deslizamento os principais tipos de desgaste atuantes no tribossistema rodatrilho para as condições da Ferrovia MRS Logística SA. No desgaste por deslizamento os principais mecanismos são microescorregamento e fadiga de contato. Porém, notou-se que os danos causados por fadiga são na maioria das vezes eliminados pelo escorregamento ou ainda, por abrasão, uma vez que as trincas de fadiga se formam porém não chegam a se propagar pois são eliminadas pelo próprio desgaste. Este mecanismo de eliminação de trincas de fadiga foi estudado por MAGEL & KALOUSEK^[4] e definido como “**Taxa ideal de desgaste**”, ou seja, taxa em que o desgaste atua no sentido favorável eliminando as trincas de fadiga formadas no rolamento.

5.3.3.1 Comparação entre as taxas obtidas em ensaio de desgaste e as verificadas em campo

O levantamento da taxa de desgaste média nas 2 rodas mostradas na Figura 76 em gramas por quilômetro rodado(g/km) é mostrado abaixo:

$$\text{Volume desgastado} \approx 1.300 \text{ cm}^3 / \text{roda}$$

$$\text{Densidade do aço} = 7,86 \text{ g / cm}^3$$

$$\text{Peso desgastado} \approx 1.300 \times 7,86 \approx 10.218 \text{ g}$$

$$\text{Km rodada} = 205.000 \text{ Km}$$

$$Q \text{ (taxa de desgaste)} \approx 10.218 / 205.000 \text{ (g/Km)}$$

$$Q = 0,0498 \text{ g/Km}$$

A taxa de desgaste média (**Q**) obtida no ensaio de desgaste com 8% de escorregamento, que, como já citado pode-se aproximar mais da realidade de uma ferrovia com muitas curvas e fortes rampas, como no caso da ferrovia da Malha Regional Sudeste-MRS, foi de **Q= 0,04349 g/Km**.

Como pode-se verificar, o valor obtido no ensaio, **Q= 0,04349 g/Km** é próximo do medido em campo **Q = 0,0498 g/Km**. Isto mostra que uma avaliação em laboratório de desgaste é um bom orientativo para desenvolvimento de materiais para este tipo de aplicação. Os resultados apresentados pelas rodas tem superado a expectativa inicial, uma vez que se projetou uma melhora de desempenho de aproximadamente 10% para o aço **Cr-V** em relação ao aço com somente **Cr** medidos em ensaio de desgaste disco-contra-disco e o que tem-se verificado em campo é um desempenho de 50% melhor em relação aos aços convencionais somente com adição de cromo.

6 CONCLUSÕES

Para as condições experimentais utilizadas no presente trabalho, os resultados do ensaio desgaste possibilitaram tirar as seguintes conclusões:

- 1.- O desgaste aumenta com a carga.
- 2.- Menores taxas de desgaste são obtidas para maiores durezas.
- 3.- Para maiores escorregamentos, como no caso 8%, a partir de uma certa distância percorrida no ensaio, atingi-se o regime permanente, em que o aumento do desgaste com a carga passa a ser linear;
- 4.- As formas e os mecanismos de desgaste verificados nos corpos-de-prova em escala microscópica correspondem aos apresentados pelas rodas em serviço, ou seja:
 - Deformação plástica significativa com forte encruamento do material;
 - Nucleação e crescimento de trincas superficiais e sub-superficiais que se propagam paralelas ou à partir da superfície levando a formação de partículas lamelares de desgaste e destacamento de material. A dimensão das partículas de desgaste formadas durante o ensaio variam com a carga, sendo as partículas maiores geradas em ensaio com maiores cargas;
 - Oxidação causada por aquecimento, deformação plástica do substrato com formação de trincas e destacamento de partículas e quebra do filme de óxido. Além dos danos quanto à oxidação, o aquecimento reduz a tensão de escoamento do material, o que aumenta a deformação plástica e enfraquece o substrato facilitando a quebra de óxidos

posteriormente formados, além de possibilitar mudança na microestrutura deformada, podendo vir a ocorrer esferoidização da perlita, o que agravaria o problema;

- Formação de martensita (camada branca), tanto em corpos-de-prova ensaiados quanto na roda em serviço. A presença de martensita frágil e de elevada dureza reduz o estado de tensão compressiva da roda e gera trincas a partir da superfície com posterior destacamento de material;
- Abrasão a dois e ou a três corpos. Em serviço, esta forma de desgaste acentua-se na região do friso da roda, principalmente em ferrovias com muitas curvas e fortes rampas. Nessas condições o desgaste abrasivo se soma ao desgaste por deslizamento devido as fortes cargas e escorregamentos aplicados no friso. Presença de partículas abrasivas nestas regiões tem um efeito pronunciado;

5.- Aços AAR classe C modificados com adições de Cr-V apresentam, para as condições estudadas, um melhor comportamento em desgaste que aços convencionais utilizados em rodas ferroviárias. Isso possivelmente se deve a estabilização do carboneto da perlita, endurecimento da ferrita, além de um refino na microestrutura possibilitando a obtenção de perlita com menores espaçamentos interlamelar.

6.- Os valores obtidos no ensaio de desgaste se aproximam dos verificados na literatura e das taxas reais verificadas em rodas em serviço. Isto é um bom orientativo de que os arranjos experimentais utilizados produzem resultados equivalentes aos da literatura e aos reais medidos em campo. Desta forma, os desenvolvimentos nesta área podem ser realizados com bons resultados em laboratório de desgaste minimizando assim custos e prazos de desenvolvimento.

ANEXO 1

Determinação dos parâmetros do ensaio

Para determinação dos parâmetros do ensaio e dimensões dos corpos de prova calculou-se primeiramente utilizando a mecânica do contato de Hertz as tensões atuantes e a geometria do contato roda-trilho dos vagões GDT da CVRD - EFC carregados com 120 t bruto, o que nos dá 15 t/roda. O modelo utilizado foi o proposto por SEELY & SMITH ^[56] que mostra que duas superfícies curvilíneas em contato sob carga em ângulos diferentes de 180°, a geometria do contato é uma elipse. Essa situação é exatamente a que ocorre no tribossistema roda-trilho. Os valores de tensão máxima no contato (σ máx), tensão de cisalhamento máxima (τ máx) e profundidade à partir do ponto de contato em que ocorre a máxima tensão de cisalhamento são calculados a seguir:

Figura 78. Representação esquemática do contato. Região F detalha a elipse de contato.

Onde:

z - Distância entre pontos correspondentes nos dois corpos à partir do plano tangente comum à eles e existe para determinar as deformações dos dois corpos próxima ao ponto inicial de contato depois de aplicadas as cargas..

A e B - São constantes que dependem dos raios de curvatura dos dois corpos no ponto de contato e do ângulo entre os planos que corta os raios dos dois corpos no plano de contato.

$$A = 1/2[(1/R'1) + (1/R2)] \quad \text{Equação 9}$$

$$B = 1/2[(1/R1) + (1/R'2)] \quad \text{Equação 10}$$

Sendo:

$R1$ - menor raio do corpo 1 no ponto de contato (Corpo 1 : trilho).

$R'1$ - maior raio do corpo 1 no ponto de contato.

$R2$ - menor raio do corpo 2 no ponto de contato.

$R'2$ - maior raio do corpo 2 no ponto de contato.

a - semi eixo maior da elipse; b - semi eixo menor da elipse.

Z_s - profundidade abaixo da superfície de contato onde a tensão de cisalhamento é máxima.

$\sigma_{\text{máx}}$ - tensão máxima de compressão no contato.

$\tau_{\text{máx}}$ - tensão de cisalhamento máxima.

E_1 e E_2 - módulo de elasticidade dos materiais dos corpos 1 e 2.

μ_1 e μ_2 - coeficiente de Poisson dos materiais dos corpos 1 e 2.

α - ângulo entre os planos dos principais raios mínimos de curvatura no ponto de contato.

Figura 79. Representação esquemática mostrando a roda e o trilho.

Conforme valores levantados por FERREIRA^[17], temos:

$$W = 15.000 \text{ Kgf} = 147.150 \text{ N}$$

$$R1 = 0,3048 \text{ m}$$

$$R'1 = \infty$$

$$R2 = 0,4826 \text{ m}$$

$$R'2 = \infty$$

$$E1 = E2 = 199,8 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$\mu1 = \mu2 = 0.3$$

Conforme SEELY& SMITH^[56] as equações para cálculo de σ máx, τ máx e Z_s são listadas à seguir:

$$\sigma_{\text{máx}} = - C \sigma (b/\Delta)$$

Equação 11

$$\tau_{\text{máx}} = C \tau (b/\Delta)$$

Equação 12

$$Z_s = C_{Zs} \times b$$

Equação 13

$$C_{zs} = 0,58$$

$$C_{\sigma} = - 0,75$$

$$C_{\tau} = 0,35$$

$$C_b = 0,78$$

Cálculo do Δ e b semi-eixo menor da elipse, conforme SEELY & SMITH ^[56].

$$\Delta = 1/A+B [2(1-\mu^2)/E] \quad \text{Equação 14}$$

$$b = C_b \cdot (W\Delta)^{1/3} \quad \text{Equação 15}$$

$$\begin{aligned} \Delta &= 2(1-0,3^2) \div [(1,64042 + 1,03605) 199,8 \times 10^9] = \\ &= 3,4034 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{N} \end{aligned}$$

$$b = 0,78 (147.150 \times 3,4034 \times 10^{-12})^{1/3} = 0,00619 \text{ m}$$

$$b/\Delta = 6.19148/3,4034 \times 10^{-12} = 1,821 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 0,75 \times 1,821 \times 10^9 = - 1,365 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$\tau_{\text{máx}} = 0,35 \times 1,821 \times 10^9 = 6,37 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$Z_s = 0,58 \times 0,00619 \text{ m} = 0,00359 \text{ m} = 3,59 \text{ mm}.$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALVES, L. H.; SINATORA, A.; TANAKA, D.; Efeito da carga no desgaste de materiais para rodas ferroviárias. II International Congress on Metallurgy and Materials Technology. **ABMM**, Brasil, (1997).
- [2] IVANOV, S. A.; MONIN, V.; CARVALHO, J. F.; RAMIRO, L. A. Análise Estrutural e Tensiométrica de Rodas de Trem. **COOPE / UFRJ**, (1994), p. 1-56.
- [3] KUMAGAI, N. et al. Factors of Wheel Flats occurrence and Preventive Measures. **Wear**, v.144 (1991), p. 277-287.
- [4] MAGEL, E.; KALOUSEK, J. Identifying and Interpreting Railway Wheel Defects. **Center for Surface Transportation Technology**, National Research Council, Canada (1996).
- [5] CVRD. Superintendência da Estrada de Ferro Carajás. **Manual de defeitos em trilhos** (1981).
- [6] GALLAGER, M. T.; WETENKAMP, H.R.; POLZIN, M.A. Increased Loading of 36" Wheels Thermal and Mechanical Considerations. **Annual Meeting Car Departament Officers Association**. Chicago, Illinois, USA (1991).
- [7] ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. **Manual of Standarts and Recommended Pratices**. Section G, AAR-M 107/208 (1998).
- [8] INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS UIC. **Technical specification for the supply of rolled solid wheels of non alloy steel for traction and rolling stock**. Section 812-3 (1990).
- [9] HIRAKAWA, K. et al "Effects of Chemical Composition and Microestruture on Wear Properties of Steels for Railroads Wheel", **Heavy Haul Conference** (1984), 82-HH-59, Colorado Springs, USA.
- [10] ASTM A 370 - 97. Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. **American Society for Testing and Materials**, v. 01-01, Section 1 (1997).
- [11] LUDEN, R. Contact region fatigue of railway wheels under combined mechanical rolling pressure and thermal brake loading, **Wear** n.144 (1991), p. 57 - 70.
- [12] DIENER. How to better define wheel material. **11th International Wheelset Congress**, Paris (1995), p. 171 - 177.
- [13] CLAYTON, P. The relation between wear behaviour and basic material properties for perlite steels. **Wear**, n. 60 (1980), p. 75 - 93.

- [14] GARNHAN, J. E.; BEYNON, J. H. Dry rolling-sliding wear bainitic and pearlitic steels. **Wear**, n. 157 (1992), p. 81 - 109.
- [15] SU, X.; CLAYTON, P. Ratchetting strain experiments with a pearlitic steel under rolling/sliding contact. **Wear**, n. 205 (1997), p. 137 - 143.
- [16] HUTCHINGS, I. M., Tribology-Friction and Wear of Engineering Materials. **Edward Arnold** (1992), p.141-150, p. 133-171.
- [17] FERREIRA, S. I. . Análise da influência da temperatura e das tensões multiaxiais na vida útil em fadiga das rodas na Estrada de Ferro Carajás. Tese apresentada à EPUSP para obtenção do título de Doutor em Engenharia. **USP/EPUSP** (1999).
- [18] SAMUEL, L. E. Optical Microscopy of Carbon Steels. **ASM** (1980), p. 225-246.
- [19] SEHITOGLU, H. Thermal and thermomechanical fatigue of structural alloys. **ASM HANDBOOK** , v. 19 (1996), p. 527-556.
- [20] KALOUSEK, J. et al . Tribological interrelationship of seasonal fluctuations of freight car wheel wear, contact fatigue shelling and composition brakeshoe consumption. **Wear**, n. 191 (1996), p. 210-218.
- [21] TSCHIPTSCHIN, A. P ; Formação de Perlita Esferoidizada em Aço Hipereutetóide. Tese apresentada à EPUSP para obtenção do título de Doutor em Engenharia. **USP-EPUSP**.
- [22] SHEWMON, P. G. Transformations in metals. **McGraw Hill Book Company**, (1969), p. 299 - 303.
- [23] FEC, M. C.; UTRATA, D. Elevated temperature fatigue behavior of class B, C and U wheel steels . JOINT ASME - IEEE RAILROAD CONFERENCE, New York, USA. **ASMS** (1985), p. 33 - 39.
- [24] KALOUSEK, J.; HORNADAY, J. H.; CALDWELL, W. N. Wheel shelling problems on the Canadian National Railways. British Columbia Northline **9th International Wheelset Congress**, Montreal, Canada (1988), Paper 5-2, p. 5-2-1 a 5-2-14.
- [25] MOYAR, G. J; STONE, D. H. An analysis of the thermal contributions to railway wheel shelling . **Wear**, n. 144 (1991), p. 117 - 138.
- [26] KIGAWA, T. et al. Development of a Wheel-Flange Hardening Facility as Assembled into Rolling Stock for Wear Prevention. **International Wheelset Congress**. Sydney, Australia (1992).
- [27] MUTTON, P. J.; DUDEK, J. Rolling contact fatigue in railway wheels higher axle loads. **Wear**, n.144 (1991), p. 139 - 152.

- [28] KUMAGAY, N.; ISHIKAWA, H; HAGA, K; KIGAWA, T; NAGASE, K. Factors of wheel flats occurrence and preventive measures. **Wear**, n.144(1991), p. 217-287.
- [29] SANTOS JR, A.; FILHO, F. R. Problemas decorrentes das tensões térmicas em rodas ferroviárias. **III Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste**, Belém, Brasil (1994).
- [30] SANTOS JR A ; FILHO, F.R. Tensões Térmicas em Rodas Ferroviárias. Laboratório Ferroviário- Departamento de Projeto Mecânico. **UNICAMP**.
- [31] JOHNSON, K. L. The mechanics of plastic deformation of surface and subsurface layers in rolling and sliding contact . **Key Engineering Materials** (1989), v. 33, p.17 - 34.
- [32] BASSIN, M. N. Study of the Wear and Adhesion of Rails and Wheels. **9th International Wheelset Congress**. Montreal, Canada (1988).
- [33] REED-HILL, R. E. Princípios de Metalurgia Física. **Guanabara Dois**. Segunda edição, p. 681-688.
- [34] KATO, K.; HOKKIRIGAWA, K. An Experimental and Theoretical Investigation of Ploughing, Artting and Wedge Formation During Abrasive Wear. **Tribology International** (1988), v. 21, p. 51-57.
- [35] JERGEUS, J. et al. Martensite Formation around Wheel Flats. **11th International Wheelset Congress**. Paris, France (1995).
- [36] OPINSK, A. J. Understanding rim thermal failures in freight car wheels. **9th International wheelset Congress**. Montreal, Canada (1988), Paper 5.5 p. 5.5.1 - 5.5.11.
- [37] ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. **Fiel Manual** (1985), p. 203-205.
- [38] TYFOUR, W. R. et al. The Steady State Wear behavior of Pearlitic Rail Steel under Dry Rolling-Sliding Contact Conditions. **Wear**, n.180 (1995), p. 79-89.
- [39] CLAYTON, P. Predicting the Wear of Rails on curves from Laboratory Data. **Wear**, n.181(1995), p. 11-19.
- [40] GALLIERA, G.; AMICI, G. Fatigue Behaviour of Railway Wheels affected by Sub-Surface Defects in the Tread. Control Methods and Manufacturing Process. **11th International Wheelset Congress** (1995), Paris, France.
- [41] BEAGLAEY, T. M.; MCEWEM, I. J.; PRITCHARD, C. Wheel/Rail Adhesion. The influence of railhead debris. **Wear**, n.36 (1975), p. 141-153.
- [42] ARONOV, V.; KALPAKJIAN, S. Wear kinetics of rail and wheel steels in dry friction condition. **Wear**, n. 61 (1980), p. 101-110.

- [43] SINGH, U. P.; SINGH, R.; MANGAL, R. K. Investigation of wheel and rail wear under conditions of sliding and rolling - sliding contact. **International wheelset congress**. Sidney, Australia (1992), p. 107-112.
- [44] GALLAGHER, M. T.; POLZIN, M. A.; CHRISTIE, C. D. Railroad wheel flange failures: causes and preventions. **ASME**. RTD – Rail transportation. Book n. G00767 (1992), p. 155 -163.
- [45] FEGREDO, D. M.; KALOUSEK, J.; SHEHATA, M. T. The effect of progressive minor spheroidization on dry-wear rates of a standart carbon and Cr-Mo alloy rail steel. **Wear**, n. 161 (1993), p. 29-40.
- [46] MARKOV, D. Laboratory tests for seizure of rail and wheel steels. **Wear**, n. 208 (1997), p. 91-104.
- [47] BEYNON, J. H.; GARNHAN, J. E.; SAWLEY, K. J. Rolling contact fatigue of three pearlitic rail steels. **Wear**, n. 192 (1996), p. 94-111.
- [48] KALOUSEK, J.; FEGREDO, D. M.; LAUFER, E. E. The wear resistance and worn metallography of pearlitic, bainite and tempered martensite rail steel microstructures of high hardness. **Wear**, n. 105 (1985), p. 199-222.
- [49] HONEYCOMBRE, R. W. K.. AÇOS - Microestruturas e Propriedades. **Fundação Calouste Gulbenkian**, Lisboa (1982), p. 41- 47.
- [50] FATIGUE AND FRACTURE. Fracture Mechanics Properties of carbon and alloy steels. **ASM HANDBOOK**, v. 19 (1996), p. 619-620.
- [51] DEMILLY, F.; CATOT, B. Contribution to improved steel grades for wheels for heavy freight trtafic. **International wheelset congress**. Sidney, Australia (1992), p. 229-233.
- [52] MARDER, A. R.; KOVALIK, J. A. Eutectoid Strutures. Metallography and Microstructures. **ASM HANDBOOK**, v. 9 (1996), 9th ediction, p. 658-661.
- [53] DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. **Guanabara Dois** (1981), p.102-105; 144-147.
- [54] AFS. Metal Casting & Molding Process. American Foundrymen's Society. **Cast Metals Series** (1981), p. 104-108.
- [55] MAXION Fundação e Equipamentos Ferroviários. **Catálogo de produtos** (1998).
- [56] SEELY, F. B.; SMITH, J. O. Method of computing contact stresses. **Advanced Mechanics of Materials**, Second Edition (1963), p. 353-360.
- [57] MORÉ FARIAS, M. C . Desgaste por deslizamento em aços inoxidáveis austeníticos. **USP-EPUSP**, (1998), p. 13-15.

- [58] PETERSON, M. B. Classification of wear processes. **Wear control handbook**, n. 96, New York (1984), p. 301-318.
- [59] SUH, N. P. The Delamination Theory of Wear. **Wear**, n. 25 (1973), p. 111-124.
- [60] PRITCHARD, D.C.; PEARCE, T.G. Tribological Design-The railwais. **Tribological design of machine elements** (1988), PaperII(ii), p. 23-32.
- [61] GARNHAN, J. E.; BEYNON, J. H.; BRIGHTLING, J. R. Rolling-Sliding dry wear testing- A vibration analisis. **Wear**, n.124 (1988), p. 45-63.
- [62] RIGNEY, D. A.; GLAERSE, W. A. Wear Resistance. Properties and Selection: Irons and Steels. **METALS HANDBOOK-ASM**, v 1, 9th Edition (1985), p. 611-615.
- [63] AHLBECK, D. R.; HARRISON , H. D. The effects of wheel/rail impact loading due wheel tread runout profiles. **9th International Wheelset Congress**, Montreal, Canadá (1988), paper 6-1, p. 6-1-1 a 6-1-6 .
- [64] FURTADO ROSA, P. M. Estudo das Condições Operacionais e de Frenagem Visando o Problema de Trincas Térmicas. **Encontro Técnico do Comitê Metro-ferroviário (CB6) ABNT**. Rio de Janeiro (1997).
- [65] COSTA E SILVA, A. L.; MEI, P. R. Tecnologia dos Aços . **UNICAMP-ELETROMETAL** (1981), p. 150-155.
- [66] PORTER, D. A. ; EASTERLING , K. E. ; "Phase Transformations in Metals and Alloys" Second Edition, **Chapman & Hall**, p. 314 - 317.
- [67] CLAYTON, P. Tribological aspects of wheel-rail contact: a review of recent experimental research. **Wear**, n. 191 (1996), p. 170-183.
- [68] SUN, J. et al. Progress in the reduction of wheel spalling. **12th Intenational wheelset congress**. Quingdao, China (1998), p. 18-30.
- [69] MAGEL, E.; KALOUSEK, J. Martensite and contact fatigue initiated wheel defects. **12th Intenational wheelset congress**. Quingdao , China (1998), p. 100-111.
- [70] HOU, K.; LAMBA, H. S.; SCOTT, R. T.; KALOUSEK, J. Wear and friction of wheel/rail materials for high adhesion locomotives. **12th Intenational wheelset congress**. Quingdao , China (1998), p. 44-53.