UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LEANDRO PRATES FERREIRA DE ALMEIDA

ESTUDO DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO DE PARES METÁLICOS EMPREGADOS NO CONTATO RODA-TRILHO

Vitória

2017

LEANDRO PRATES FERREIRA DE ALMEIDA

ESTUDO DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO DE PARES METÁLICOS EMPREGADOS NO CONTATO RODA-TRILHO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração de Ciência e Engenharia dos Materiais: Tribologia.

Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian.

Coorientador: Prof; Dr. Antônio Cesar Bozzi.

Vitória

2017

LEANDRO PRATES FERREIRA DE ALMEIDA

ESTUDO DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO DE PARES METÁLICOS EMPREGADOS NO CONTATO RODA-TRILHO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração de Ciência e Engenharia dos Materiais: Tribologia.

Aprovado em 24 de fevereiro de 2017.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Cherlio Scandian
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Antônio Cesar Bozzi
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Amilton Sinatora
Universidade de São Paulo
Avaliador Externo

Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello
Universidade Federal de Uberlândia
Avaliador Externo

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Declaro, para os devidos fins de pesquisa acadêmica, didática e tecno-científica, que a presente Dissertação de Mestrado pode ser parcial ou totalmente utilizada desde que se faça referência à fonte e aos autores.

Vitória, 24 de fevereiro de 2017.

Leandro Prates Ferreira de Almeida

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar e dar serenidade e segurança quando foi necessário.

À minha família, por todo o amor, incentivo e toda torcida para que eu alcançasse meus objetivos. Em especial à minha mãe, Adelaide, por ser um exemplo de determinação e coragem; à minha esposa, Mariana, pelo apoio, compreensão em meus momentos de ausência e por estar sempre ao meu lado; às minhas tias Fátima e Penha, por participarem diretamente da minha formação escolar, que me permitiu chegar até aqui.

Aos Professores Dr. Cherlio Scandian e Dr. Antônio Cesar Bozzi pela orientação, paciência, contribuição e pelos ensinamentos.

Ao Professor Me. Leandro Entringer Falqueto, pela parceria neste trabalho, tanto na realização dos ensaios e análises em laboratório, quanto nas discussões e entendimento dos resultados.

Ao Professor Dr. Amilton Sinatora, emérito da Universidade de São Paulo (USP) e atualmente Pesquisador Titular no Instituto Tecnológico Vale, pelas sugestões, apoio e por idealizar a Cátedra do Projeto Roda-Trilho em seus moldes atuais, o que me permitiu desenvolver a pesquisa.

Aos Engenheiros Esp. Edilson Jun Kina e Esp. Aldo Marconi Wessen Machado, pela confiança depositada, por me permitirem fazer parte do Projeto Roda-Trilho da Vale e pelo apoio financeiro em algumas etapas deste trabalho.

Aos Engenheiros Dr. Domingos José Minicucci e Roger Nascimento, das empresas MWL Brasil e Amsted Maxion, pelo fornecimento das amostras de rodas e confecção dos discos.

Ao Técnico de Laboratório Yukio Nishida, do Laboratório de Caracterização de Superfícies e Materiais (LCSM), pela obtenção das imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Ao Técnico de Laboratório Carlos Alberto Rosa Neto, do Laboratório de Tribologia, Materiais e Corrosão (TRICORRMAT), pela preparação das amostras, medições de dureza e avaliação microestrutural.

Ao Engenheiro Marcos Ara, pela receptividade em minha visita ao Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Universidade de São Paulo (USP).

Ao Professor Dr. Washington Martins da Silva Jr., da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela medição de dureza Vickers HV_{30} dos discos de rodas fundidas e forjadas.

Ao Professor Dr. Hélio Goldenstein e à Graduanda em Engenharia Jacy Ellen Guimarães Silva, da Universidade de São Paulo (USP), pela ajuda fundamental na avaliação da microestrutura dos discos fundidos e forjados.

Aos colegas do Mestrado em Engenharia Mecânica da UFES, especialmente da área de concentração de Ciências e Engenharia dos Materiais, pelas boas discussões em prol de democratizar o conhecimento de cada um.

À Vale, pela oportunidade de desenvolver o trabalho na linha de pesquisa do contato roda-trilho.

À Universidade Federal do Espírito Santo e toda equipe técnica e administrativa do PPGEM, pela contribuição durante estes anos.

RESUMO

O estudo do contato roda-trilho tem ganhado importância na Engenharia Ferroviária, especialmente por trilho e roda representarem os segundo e terceiro maiores custos com materiais na ferrovia, ficando atrás somente dos gastos com combustível. Geralmente o fim de vida destes componentes se dá devido ao desgaste. As condições de contato variam de acordo com as particularidades de cada ferrovia, como carga, velocidade, traçado e materiais utilizados, entre outros. Com o objetivo de entender os mecanismos de desgaste existentes para as condições de contato típicas da Estrada de Ferro Vitória a Minas, foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento na configuração pino-disco, sem lubrificação, com velocidade de deslizamento variável e carga normal constante. Os pinos, de extremidade esférica, foram fabricados com material do trilho convencional da EFVM – aço perlítico com dureza superficial de 370 Brinell – e os discos foram fabricados com material de rodas fundidas e forjadas da classe C da norma AAR. O volume desgastado dos pinos foi calculado com base no diâmetro da calota de desgaste. Já nos discos, o volume desgastado foi obtido por perfilometria 3D. Os mecanismos de desgaste foram analisados com auxílio de um microscópio estereoscópico e de um microscópio eletrônico de varredura. Os resultados indicam um aumento no coeficiente de atrito nos ensaios à velocidade de 0,9 m/s – μ aproximadamente 0,8 – quando comparado com os valores obtidos à velocidade de 0,1 m/s, onde μ ficou entre 0,5 e 0,6. Já a severidade do desgaste, tanto dos pinos quanto dos discos, foi maior nos ensaios realizados com velocidade de deslizamento de 0,1 m/s. Comparando os diferentes materiais dos discos, o desgaste de pinos e discos foi consideravelmente maior nos sistemas com rodas forjadas. Os mecanismos de desgaste observados foram predominantemente de natureza plástica, com ocorrência de sulcos plásticos e adesão de materiais oxidados na superfície de pinos e discos.

Palavras-chave: roda, trilho, ferrovia, desgaste por deslizamento, pino, disco, mecanismos de desgaste.

ABSTRACT

The study of wheel-rail contact is getting important in Railway Engineering, especially because rail and wheel represent the second and third largest costs of materials on the railroad – the first is fuel. Usually, the end of life of these components is due to wear. The contact conditions changes according to the specificities of each railroad, such as load, speed, track design and materials used, among others. In order to understand the existing wear mechanisms for the typical contact conditions of the Estrada de Ferro Vitória a Minas, slip-wear tests were performed in the pin-on-disc configuration, without lubrication, with variable sliding speed and constant normal load. The spherical end pins were manufactured from conventional EFVM rail material - 370 Brinell surface hardness pearlitic steel - and the discs were manufactured from AAR grade Class C cast and forged wheel material. The worn volume of the pins was calculated based on the diameter of the wear scar. For the discs, the worn volume was obtained by 3D profilometry. The wear mechanisms were analyzed using a stereoscopic microscope and a scanning electron microscope. The results indicate an increase in the coefficient of friction in the tests at a speed of 0.9 m/s - μ approximately 0.8 - when compared to the values obtained at a speed of 0.1 m/s - μ between 0.5 and 0.6. The wear severity of both pins and discs was higher in the tests carried out with a sliding speed of 0.1 m/s. Comparing the different materials of the discs, the wear of pins and discs was considerably greater in systems with forged wheels. The wear mechanisms observed were predominantly of plastic nature, with occurrence of ploughing and adhesion of oxidized materials on the surface of pins and discs.

Key-words: wheel, rail, railroad, slip-wear, pin, disc, wear mechanisms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Desenho esquemático dos contatos de rolamento e deslizamento. Fonte: adaptado de (HUTCHINGS, 1992).....28

Figura 2.2 – Desenho esquemático dos principais mecanismos de desgaste. Fonte: adaptado de (ZUM GAHR, 1987).....29

Figura 2.3 – Desenho esquemático de uma roda ferroviária. Fonte: adaptado de (FREITAS, 2015).....31

Figura 2.4 – Microestruturas de rodas ferroviárias forjadas classe C com (a) resfriamento lento – perlita e ferrita (b) resfriamento rápido – martensita revenida. Fonte: adaptado de (MAIA *et al*, 2010).....32

Figura 2.5 – Microestruturas de rodas ferroviárias classe C (a) fundida e (b) forjada. Fonte: adaptado de (FREITAS, 2015).....33

Figura 2.6 – Microestruturas de rodas ferroviárias com composição química similar à da classe A da norma AAR. Fontes: (a) adaptado de (HE *et al*, 2016) e (b) adaptado de (ZENG *et al*, 2016).....33

Figura 2.7 – Microestruturas de rodas ferroviárias classe C (a) forjada e (b) fundida, obtidas no MEV. Fonte: adaptado de (CHAVES, 2017).....34

Figura 2.8 – Desenho esquemático de trilho convencional Vignole e sua terminologia. Fonte: adaptado da norma AREMA (2014).....34

Figura 2.9 – Microestrutura de trilho padrão AREMA. Fonte: adaptado de (MACEDO *et al*, 2001).....35

Figura 2.10 – Desenho esquemático do contato da roda com o trilho. Fonte: adaptado de (SHEVTSOV, 2008).....36

Figura 2.11 – Desenho esquemático do rodeiro de ataque em curva para direita. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2009).....36

Figura 2.12 – Desenho esquemático das zonas de contato roda-trilho. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2009).....37

Figura 2.13 – Região de contato entre duas lentes cilíndricas inclinadas a 45° e com carregamento. Fonte: (SANTOS, 2000).....38

Figura 2.14 – Desenho esquemático da elipse de contato e distribuição de pressão no contato roda-trilho. Fonte: (SANTOS, 2000).....38

Figura 2.15 – Mapas de pressão de contato para carregamento de 80 kN: (a) medição ultrassônica e (b) teoria de Hertz. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2009).....39

Figura 2.16 - Desenho esquemático da distribuição da pressão de contato entre uma esfera carregada elasticamente contra um plano. Fonte: adaptado de (HUTCHNGS, 1992).....40

Figura 2.17 – Aderência e escorregamento devido às deformações elásticas. Fonte: (SANTOS, 2000).....40

Figura 2.18 – Vista superior de uma roda trafegando sobre trilho, com as velocidades e ângulo de ataque. Fonte: (SANTOS, 2000).....41

Figura 2.19 – Spin devido à conicidade da roda. Fonte: adaptado de (SANTOS, 2000).....42

Figura 2.20 – Forças tangenciais e microescorregamento na região de contato. Fonte: (SANTOS, 2000).....42

Figura 2.21 – (a) Micrografia de superfície e (b) *debris* típicos do modo de desgaste tipo I. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).....45

Figura 2.22 – (a) Micrografia de superfície e (b) *debris* típicos do modo de desgaste tipo II. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).....46

Figura 2.23 – (a) Micrografia de superfície e (b) *debris* típicos do modo de desgaste tipo III. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).....46

Figura 2.24 – Desenho esquemático do perfil típico de trilho desgastado. Fonte: (BOLTON e CLAYTON, 1984).....47

Figura 2.25 – Gráficos da taxa de desgaste vs. pressão de contato, em diferentes escorregamentos, para disco fabricado com material de roda em rolamento contra discos fabricados a partir de 4 diferentes tipos de trilho. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).....48

Figura 2.26 – Gráficos da taxa de desgaste vs. pressão de contato, em diferentes escorregamentos, para discos fabricados a partir de 4 diferentes tipos de trilho em

rolamento contra disco fabricado com material de roda. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).....48

Figura 2.27 – Gráfico das taxas de desgaste vs. Tγ/A para os discos de roda e de diferentes tipos de trilho, no regime de desgaste tipo II. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).....49

Figura 2.28 – Variação das taxas de desgaste dos discos de diferentes tipos de trilho em relação ao escorregamento (γ), em ensaios sob o carregamento de 200 kgf. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).....50

Figura 2.29 – (a) Micrografia de superfície desgastada no regime tipo III – ensaio twin disc; (b) Seção transversal do disco. Fonte: adaptado de (DANKS e CLAYTON, 1987).....51

Figura 2.30 – (a) Superfície do trilho, no canto de bitola; (b) Seção transversal do trilho. Fonte: adaptado de (DANKS e CLAYTON, 1987).....52

Figura 2.31 – Gráficos da taxa de desgaste vs. pressão de contato no regime tipo III. Fonte: adaptado de (DANKS e CLAYTON, 1987).....52

Figura 2.32 – Taxa de desgaste de aços de trilhos vs. dureza e espaçamento interlamelar. Linha A: P0 = 1300 MPa e γ = 3%. Linha B: P0 = 500 MPa e γ = 10%. Fonte: adaptado de (PEREZ-UNZUETA e BEYNON, 1993).....53

Figura 2.33 – Taxas de desgaste do ensaio pino-disco, em relação ao carregamento. Fonte: adaptado de (DANKS e CLAYTON, 1987).....54

Figura 2.34 – Superfícies desgastadas dos pinos com (a) 30 N de carga e (b) 1670 N de carga; (c) *Debris* acumulado na trilha de desgaste. Fonte: adaptado de (DANKS e CLAYTON, 1987).....54

Figura 2.35 – Taxa de desgaste de aços de trilhos vs. dureza e espaçamento interlamelar. Ensaios de deslizamento puro. Fonte: adaptado de (PEREZ-UNZUETA e BEYNON, 1993).....55

Figura 2.36 – Imagem do aço do trilho após ensaio de deslizamento puro à pressão nominal máxima de 20 MPa, retirada do MEV. Fonte: adaptado de (PEREZ-UNZUETA e BEYNON, 1993).....56

Figura 2.37 – Aspecto da superfície transversal de pinos perlíticos tratados em patamares isotérmicos de (a) 550 °C; (b) 625 °C e (c) 700 °C, após ensaios de desgaste na configuração pino-disco. Fonte: adaptado de (CHAVES, 2017).....57

Figura 2.38 – Gráficos da taxa de desgaste vs. carga aplicada para os pinos dos 3 tipos de trilhos contra (a) discos de roda forjada de dureza 227 HB e (b) discos de roda fundida de dureza 324 HB. Fonte: adaptado de (SINGH, U. P.; SINGH, R. 1993).....58

Figura 2.39 – Variação da perda de massa média dos pinos em função do espaçamento interlamelar da perlita. Fonte: (CHAVES, 2017).....59

Figura 2.40 – Variáveis para quantificação do desgaste. Fonte: adaptado de (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).....60

Figura 2.41 – Dados dos ensaios sobrepostos ao resultado da simulação na curva 2, com 303 m de raio e sem lubrificação. Fonte: adaptado de (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).....61

Figura 2.42 – Desenhos esquemáticos dos ensaios nas configurações (a) pino-disco e (b) twin disc. Fonte: adaptado de (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).....61

Figura 2.43 – Coeficientes de desgaste dos ensaios de pino-disco e twin disc. Fonte: adaptado de (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).....62

Figura 2.44 – Taxa de desgaste em função da carga normal, para pinos perlíticos e bainíticos. Fonte: adaptado de (VIÁFARA *et al*, 2005).....63

Figura 2.45 – Variação da microdureza em função da profundidade a partir da superfície desgastada em pinos perlíticos de aço AISI 1070. Fonte: adaptado de (VIÁFARA *et al*, 2005).....64

Figura 2.46 – Variação do coeficiente de atrito em função da distância deslizada e da carga normal, para (a) pinos perlíticos e (b) bainíticos. Fonte: adaptado de (VIÁFARA *et al*, 2005).....64

Figura 2.47 – Superfícies desgastadas do pino de aço AISI 1070, para diferentes cargas. Fonte: (VIÁFARA *et al*, 2005).....65

Figura 2.48 – Superfícies desgastadas do pino de aço AISI 15B30, para diferentes cargas. Fonte: (VIÁFARA *et al*, 2005).....65

Figura 2.49 – (a) Juntas de adesão e (b) trincas subsuperficiais observadas na superfície desgastada de pino de aço AISI 1070. Fonte: (VIÁFARA *et al*, 2005).....65

Figura 2.50 – (a) Juntas de adesão quebradas e (b) marcas de cisalhamento identificadas em *debris* de pinos de aço AISI 1070 - análise no MEV. Fonte: (VIÁFARA *et al*, 2005).....66

Figura 2.51 – (a) Juntas de adesão quebradas e (b) marcas de cisalhamento identificados em *debris* de pinos de aço AISI 15B30 - análise no MEV. Fonte: (VIÁFARA *et al*, 2005).....66

Figura 2.52 – Gráficos do coeficiente de atrito μ vs. umidade relativa, para amostras limpas e oxidadas, em diferentes temperaturas de ensaio. Fonte: adaptado de (ZHU *et al*, 2015).....67

Figura 2.53 – Micrografias de pinos (a) 20 °C, UR = 40%, contra disco limpo; (b) 20 °C, UR = 85%, contra disco limpo; (c) 10 °C, UR = 85%, contra disco limpo. Fonte: adaptado de (ZHU *et al*, 2015).....68

Figura 2.54 – Mapas de desgaste: trilho BS11 e roda perlítica. Ensaios twin disc. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2004. Dados de BOLTON e CLAYTON, 1984).....69

Figura 2.55 – Mapas de desgaste: trilho aço carbono e roda não especificada. Ensaios twin disc. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2004. Dados de DANKS e CLAYTON, 1987).....69

Figura 2.56 – Mapas de desgaste: trilho UIC60 900A e roda R7. Ensaios pino-disco e twin disc. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2004. Dados de OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).....70

Figura 2.57 – Temperaturas de contato e coeficientes de desgaste para ensaios em twin disc com trilhos UIC60 900A e roda R8T. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2004).....70

Figura 2.58 – Mapa de desgaste dos ensaios com materiais de trilho UIC60 900A e roda R7 sobre gráfico com as condições de contato roda-trilho da ferrovia de Estocolmo. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2004).....71

Figura 2.59 – Dados de contato de diversas pesquisas na área de roda-trilho sobrepostos ao gráfico típico das condições de contato da ferrovia sueca. Fonte: adaptado de (SUNDH *et al*, 2008).....72

Figura 3.1 – Desenho esquemático com a posição de retirada dos discos nas rodas (fora de escala). Fonte: Autor.....73

Figura 3.2 – Desenho técnico dos discos utilizados nos ensaios. Dimensões em mm. Fonte: (FALQUETO, 2015).....74

Figura 3.3 – Desenho esquemático dos pinos utilizados nos ensaios e sua posição de retirada no trilho (fora de escala). Dimensões em mm. Fonte: Autor.....75

Figura 3.4 – (a) Configuração do ensaio com tribômetro Phoenix Plint TE67 do TRICORRMAT/UFES e (b) detalhe do contato entre pino e disco. Fonte: Autor.....77

Figura 3.5 – Esquema com as posições das medições dos perfis topográficos da trilha de desgaste do disco, para cálculo do volume desgastado. Fonte: Autor.....78

Figura 3.6 – Exemplo de medição do perfil da trilha de desgaste, para cálculo do volume desgastado através das medidas da área da seção transversal, destacada em vermelho na figura. Fonte: Autor.....78

Figura 3.7 – Desenho esquemático do pino desgastado, com os parâmetros utilizados no cálculo do volume de desgaste (fora de escala). Fonte: Autor.....79

Figura 3.8 – Exemplo de medição da calota de desgaste da extremidade esférica do pino. Fonte: Autor.....80

Figura 4.1 – Microestrutura do disco fundido obtida através de microscopia óptica, revelada com ataque de Nital 2%. Região (a) com fase predominante de perlita fina e região (b) com fase predominante de bainita superior. Fonte: Autor.....81

Figura 4.2 – Microestrutura do disco fundido obtida através do MEV, revelada com ataque de Nital 2%. Perlita na metade inferior e bainita na metade superior. Fonte: Autor.....82

Figura 4.3 – Microestrutura do disco forjado obtida através de microscopia óptica, revelada com ataque de Nital 2. Fonte: Autor.....83

Figura 4.4 – Microestrutura do disco forjado obtida através do MEV, revelada com ataque de Nital 2%. Presença de perlita lamelar (PL) e bainita (B) misturadas, além de regiões com perlita degenerada (PD). Fonte: Autor.....84

Figura 4.5 – Microestruturas obtidas em MEV para aços 1080 tratados em patamares isotérmicos de (a) 475 °C e (b) 500 °C. Observada presença de perlita degenerada (PD) e bainita superior (BS). Fonte: adaptado de (CHAVES, 2017).....85

Figura 4.6 – Microestrutura do pino, revelada com ataque de Nital 3%. Fonte: Autor.....86

Figura 4.7 – Resultados de dureza Vickers dos pinos e discos, carga de 10 kgf. Fonte: Autor.....86

Figura 4.8 – Resultados de dureza Brinell dos discos, carga de 187,5 kgf. Fonte: Autor.....87

Figura 4.9 – Gráfico do coeficiente de atrito dos ensaios com discos fundidos e velocidade de deslizamento de 0,1 m/s. Fonte: Autor.....88

Figura 4.10 – Gráfico do coeficiente de atrito dos ensaios com discos forjados e velocidade de deslizamento de 0,1 m/s. Fonte: Autor.....89

Figura 4.11 – Gráficos do coeficiente de atrito dos ensaios com discos fundidos e velocidade de deslizamento de 0,9 m/s. Fonte: Autor.....89

Figura 4.12 – Gráficos do coeficiente de atrito dos ensaios com discos forjados e velocidade de deslizamento de 0,9 m/s. Fonte: Autor.....90

Figura 4.13 – Valores médios do coeficiente de atrito. As barras representam a variação dos valores de μ: 2 medidas para cada configuração. Fonte: Autor.....90

Figura 4.14 – Coeficiente de desgaste dimensional ($mm^3/m.N$) dos discos fundidos e forjados, na escala logarítmica e em função da velocidade de deslizamento (m/s). Fonte: Autor.....94

Figura 4.15 – Coeficiente de desgaste dimensional ($mm^3/m.N$) dos pinos em deslizamento contra discos fundidos e forjados, na escala logarítmica e em função da velocidade de deslizamento (m/s). Fonte: Autor.....94

Figura 4.16 – Variação da pressão de contato versus tempo de ensaio para deslizamento de pino sobre (a) disco fundido à velocidade de 0,1 m/s; (b) disco fundido

à velocidade de 0,9 m/s; (b) disco forjado à velocidade de 0,1 m/s; (d) disco forjado à velocidade de 0,9 m/s. Fonte: Autor.....97

Figura 4.17 – Área aparente desgastada dos pinos de acordo com a distância deslizada – 30 m, 149 m e 358 m para ensaios à velocidade de 0,1 m/s (interrupções após 3, 25 e 60 minutos de ensaio) e 46 m, 154 m e 530 m para ensaios à velocidade de 0,9 m/s (interrupções após 1, 3 e 10 minutos de ensaio). Fonte: Autor.....99

Figura 4.18 – Coeficiente de desgaste dimensional ($mm^3/N.m$) em função do coeficiente de atrito médio para os ensaios realizados com discos fundidos e forjados a velocidades de 0,1 m/s e 0,9 m/s. Fonte: Autor.....100

Figura 4.19 – Trilhas de desgaste de discos (a) fundidos e (b) forjados, após ensaio à velocidade de 0,1 m/s. Observação no microscópio estereoscópico. Fonte: Autor.....101

Figura 4.20 – Trilhas de desgaste de discos (a) fundidos e (b) forjados, após ensaio à velocidade de 0,9 m/s. Observação no microscópio estereoscópico. Fonte: Autor.....101

Figura 4.21 – Observação no MEV dos mecanismos de desgaste de discos fundidos após ensaio à velocidade de 0,1 m/s – (a) Trilha de desgaste com destaque para o material deslocado para a borda do sulco plástico (elipse) e para regiões com material oxidado aderido (setas); (b) detalhe da região da borda do sulco; (c) detalhe da região com *debris* oxidado aderido à superfície. Fonte: Autor.....103

Figura 4.22 – Observação no MEV dos mecanismos de desgaste de discos de forjados após ensaio à velocidade de 0,1 m/s – (a) Trilha de desgaste com destaque para o material deslocado para a borda do sulco plástico (elipse) e para regiões com material oxidado aderido (setas); (b) detalhe da região da borda do sulco; (c) detalhe da região com *debris* oxidado aderido à superfície. Fonte: Autor.....104

Figura 4.23 – Observação no MEV dos mecanismos de desgaste de discos fundidos após ensaio à velocidade de 0,9 m/s – (a) Trilha de desgaste com destaque para o material deslocado para a borda do sulco plástico (elipse) e para regiões com material oxidado aderido (setas); (b) detalhe da região da borda do sulco; (c) detalhe da região com *debris* oxidado aderido à superfície. Fonte: Autor.....106

Figura 4.24 – Observação no MEV dos mecanismos de desgaste de discos forjados após ensaio à velocidade de 0,9 m/s – (a) Trilha de desgaste com destaque para o material deslocado para a borda do sulco plástico (elipse) e para regiões com material oxidado aderido (setas); (b) detalhe da região da borda do sulco; (c) detalhe da região com *debris* oxidado aderido à superfície. Fonte: Autor.....107

Figura 4.25 – (a) Superfície desgastada de pino ensaiado contra disco fundido, à velocidade de 0,1 m/s, observada em microscópio estereoscópico; (b) Material aderido no pino. Fonte: Autor.....109

Figura 4.26 – (a) Superfície desgastada de pino ensaiado contra disco forjado, à velocidade de 0,1 m/s, observada em microscópio estereoscópico; (b) Material aderido no pino Fonte: Autor.....110

Figura 4.27 – Superfície desgastada de pino ensaiado contra disco fundido, à velocidade de 0,9 m/s, observada em microscópio estereoscópico. Fonte: Autor.....111

Figura 4.28 – Superfície desgastada de pino ensaiado contra disco forjado, à velocidade de 0,9 m/s, observada em microscópio estereoscópico. Fonte: Autor.....111

Figura 4.29 – Superfícies desgastadas de pinos ensaiados contra discos fundidos, às velocidades de (a) 0,1 m/s e (b) 0,9 m/s. Observação no MEV. Fonte: Autor.....112

Figura 4.30 – Superfícies desgastadas de pinos ensaiados contra discos forjados, às velocidades de (a) 0,1 m/s e (b) 0,9 m/s. Observação no MEV. Fonte: Autor.....113

Figura 4.31 – Detalhe dos materiais aderidos aos pinos ensaiados contra discos (a) fundido e (b) forjado, à velocidade de 0,1 m/s. Observação no MEV. Fonte: Autor.....114

Figura 4.32 – Detalhe dos materiais aderidos aos pinos ensaiados contra discos (a) fundido e (b) forjado, à velocidade de 0,9 m/s. Observação no MEV. Fonte: Autor.....115

Figura 4.33 – Observação no MEV dos *debris* coletados após ensaio com disco fundido, à velocidade de 0,1 m/s – (a) Plaqueta de aproximadamente 150 µm de

comprimento entre partículas irregulares menores que 5 µm; (b) Detalhe da rugosidade da plaqueta. Fonte: Autor.....116

Figura 4.34 – Observação no MEV dos *debris* coletados após ensaio com disco forjado, à velocidade de 0,1 m/s – (a) Plaqueta de aproximadamente 250 µm de comprimento entre partículas irregulares menores que 5 µm; (b) *Debris* acumulados, formando plaqueta de aproximadamente 230 µm de comprimento. Fonte: Autor.....117

Figura 4.35 – Observação no MEV dos *debris* coletados após ensaio com disco fundido, à velocidade de 0,9 m/s – (a) Plaquetas de aproximadamente 50 µm de comprimento entre partículas irregulares menores que 5 µm; (b) Detalhe da rugosidade da plaqueta. Fonte: Autor.....118

Figura 4.36 – Observação no MEV dos *debris* coletados após ensaio com disco forjado, à velocidade de 0,9 m/s – (a) Plaqueta de aproximadamente 140 µm de comprimento entre partículas irregulares menores que 5 µm; (b) *Debris* acumulados, formando plaqueta de aproximadamente 230 µm de comprimento. Fonte: Autor.....119

Figura 4.37 – Perfil de microdureza dos discos fundidos e forjados após a realização dos ensaios a velocidades de 0,1m/s e 0,9 m/s. Fonte: Autor.....122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química, em peso, das rodas ferroviárias, por classe.....31

Tabela 2.2 – Composição química, em peso, de trilhos convencionais.....35

Tabela 2.3 – Composição química dos materiais ensaiados por Bolton e Clayton.....44

Tabela 2.4 – Espaçamento interlamelar médio da perlita e dureza dos aços dos trilhos.....58

Tabela 2.5 – Características dos pinos utilizados nos ensaios pino-disco.....58

Tabela 2.6 – Resultados de coeficiente de desgaste e coeficiente de atrito médio para as diferentes condições de contato do ensaio pino-disco.....62

Tabela 2.7 – Microestrutura e a dureza medida para os aços estudados.....63

Tabela 3.1 – Composição química das rodas classe C da norma AAR.....73

Tabela 3.2 – Composição química dos trilhos perlíticos utilizados nos ensaios.....74

Tabela 4.1 – Faixa de dureza Brinell para rodas ferroviárias.....87

Tabela 4.2 – Resultados de desgaste dos discos fundidos e forjados.....93

Tabela 4.3 – Resultados de desgaste dos pinos em deslizamento contra discos fundidos e forjados.....93

Tabela 4.4 – Comparação entre os valores obtidos para o coeficiente de desgaste dimensional ‘k’ dos pinos e discos nos sistemas com discos fundidos e forjados.....95

Tabela 4.5 – Comparação entre os valores obtidos para o coeficiente de desgaste dimensional ‘k’ dos pinos e discos para as diferentes velocidades de deslizamento.....96

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
B	Bainita
D_1	Diâmetro do disco superior
D_2	Diâmetro do disco inferior
E	Módulo de Young
F	Força de atrito
H	Dureza da superfície mais macia
HB	Dureza Brinell
$HV_{0,05}$	Microdureza Vickers obtida com carga de 0,05 kgf
HV_{10}	Dureza Vickers obtida com carga de 10 kgf
HV_{30}	Dureza Vickers obtida com carga de 30 kgf
h_e	Altura da calota esférica removida pelo desgaste
k	Coeficiente de desgaste dimensional
K	Coeficiente de desgaste adimensional
P	Pressão de contato máxima
PD	Perlita degenerada
PL	Perlita lamelar
Q	Volume desgastado por unidade de deslizamento
R	Raio equivalente
R_1	Raio da roda
R_2	Raio do trilho
r_e	Raio da calota esférica removida pelo desgaste
R_e	Raio da esfera
S	Espaçamento interlamelar da perlita
$S_1^{-1/2}$	Raiz inversa do espaçamento interlamelar

T	Força tangencial
UR	Umidade relativa
Vc	Velocidade circunferencial
V_e	Volume total desgastado da esfera
Vm	Velocidade média
Vt	Velocidade de translação
W	Carga normal
πa^2	Área de contato entre esfera e plano
μ	Coeficiente de atrito
α	Ângulo de ataque da roda no trilho
θ	Conicidade da roda
γ	Escorregamento
ω	Velocidade angular
ν	Coeficiente de Poisson
ξ_{sp}	*Spin* - microescorregamento rotacional
ξ_x	Microescorregamento longitudinal
ξ_y	Microescorregamento lateral

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAR	*Association of American Railroad*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
AREMA	*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
FAST	*Facility for Accelerated Service Testing*
LabMicro	Laboratório de Microscopia Eletrônica e de Força Atômica
LCSM	Laboratório de Caracterização de Superfícies e Materiais
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície
LTM	Laboratório de Tribologia e Materiais
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
TRICORRMAT	Laboratório de Tribologia, Materiais e Corrosão
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 28
2.1. TRIBOLOGIA 28
2.2. ATRITO 28
2.3. DESGASTE 29
2.3.1. Desgaste por deslizamento 30
2.4. RODA 31
2.5. TRILHO 34
2.6. CONTATO RODA-TRILHO 35
2.6.1. Teoria de Hertz 37
2.6.2. Microescorregamento (*creepage*) 40
2.7. ENSAIOS EM LABORATÓRIO 43
2.7.1. Trabalho de Bolton e Clayton 44
2.7.2.* Ensaios *twin disc 50
2.7.3. Ensaios pino-disco 53
2.7.4. Mapeamento dos regimes de desgaste 68
2.7.5. Definição de parâmetros dos ensaios para EFVM 71
3. MATERIAIS E MÉTODOS 73
3.1. MATERIAIS 73
3.1.1. Discos 73
3.1.2. Pinos 74
3.2. MÉTODOS 75
3.2.1. Caracterização das amostras 75
3.2.2. Ensaio de deslizamento pino-disco 76
3.2.3. Avaliação de desgaste dos discos 77
3.2.4. Avaliação de desgaste dos pinos 79
3.2.5. Avaliação dos mecanismos de desgaste 80
3.2.6. Avaliação da influência do encruamento dos discos 80
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 81
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 81
4.1.1. Microestrutura 81
4.1.2. Dureza 86
4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIBOLÓGICOS 87

4.2.1. Atrito 87
4.2.2. Desgaste 91
4.2.3. Mecanismos de desgaste 100
4.2.4. Verificação da influência de encruamento dos discos no desgaste 121
5. CONCLUSÕES 123
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 125
7. REFERÊNCIAS 126
APÊNDICE A 130
APÊNDICE B 131
APÊNDICE C 132

1. INTRODUÇÃO

A Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) é uma ferrovia com 112 anos de existência, que liga o Espírito Santo à Minas Gerais através de 905 km de extensão de linhas férreas (DALMASO, 2010). Atualmente operada pela Vale, é caracterizada por ser uma ferrovia muito sinuosa e de curvas fechadas. Segundo Dalmaso (2010), o menor raio de curva da EFVM é de 110,52 metros e está presente no trecho Drummond-Itabira. Neste mesmo trecho, o raio predominante é de 143,24 metros. Em outros trechos desta ferrovia, os raios mínimos existentes estão na faixa dos 200 metros, com os raios predominantes variando entre 200 e 350 metros. Para comparação, a Estrada de Ferro Carajás (EFC), também com operação da Vale, tem somente 27% de sua malha formada por curvas, com raio mínimo de 860 metros (PEREIRA, 2009).

As diferentes geometrias das ferrovias promovem diferentes condições de operação, assim como diferentes comportamentos quanto ao contato roda-trilho. Santos (2000) coloca rodas e trilhos entre os principais componentes mecânicos da ferrovia. Destaca o trilho como o “responsável pela sustentação dos trens e de todos seus componentes” e a roda como o item cuja função é “ser o elemento de apoio do peso dos veículos ferroviários”. Semprebone (2005) cita que no transporte ferroviário “o veículo é guiado sobre trilhos metálicos através de rodas também metálicas. O contato roda-trilho causa desgaste em ambos elementos, sendo que as tensões de contato, que ocorrem numa pequena área, são responsáveis pelo surgimento de muitos defeitos nos trilhos”. Bellodi (2010) explica que “As rodas de trens sofrem desgaste quando em contato com a via férrea, o que sistematicamente gera modificação do perfil na região de contato com o trilho”.

Trilho e roda representam os segundo e terceiro itens de consumo de maior custo para as ferrovias da Vale, ficando atrás apenas do custo com combustível. Para Freitas (2015), “A confiabilidade aliada à redução de custo dos materiais é atualmente um dos fatores mais avaliados pelas Operadoras Ferroviárias”. Clayton (1996) menciona que o desgaste de face de bitola dos trilhos e do friso e passeio de rodas são problemas economicamente importantes para as ferrovias.

Na história da engenharia ferroviária tem sido constante a procura por melhores materiais de roda e trilhos para atender ao aumento da demanda tribológica, devido às condições de serviço mais severas, especialmente por causa das maiores

velocidades e cargas por eixo. Um dos requisitos para o futuro é o aumento de vida e confiabilidade de trilhos e rodas. Entender a interação entre roda e trilho é um desafio complexo para permitir o aumento da demanda de serviços ferroviários (CLAYTON, 1996).

Devido à importância destes dois itens, tanto para a confiabilidade e segurança das operações quanto para o custo da ferrovia, criou-se na Vale o Projeto Roda-Trilho, cujo objetivo principal é promover ações para aumentar, de forma sustentável, a vida útil de rodas e trilhos ferroviários, reduzindo custos a médio e longo prazo. Dentro do projeto foi idealizado o Programa da Cátedra, em parceria com a Universidade de São Paulo (USP) e em rede com diversas instituições acadêmicas, entre elas a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). A proposta da Cátedra é fomentar o conhecimento teórico no tema do contato roda-trilho dentro da Vale e das instituições parceiras, de modo que isto seja a base para futuros desenvolvimentos e projetos voltados para este assunto.

Clayton (1996) comenta que a abordagem empírica continuará sendo necessária para o entendimento de alguns problemas práticos e que a utilização de modelos analíticos pode ser útil para estimar razoavelmente a vida ao desgaste de rodas e trilhos. Ele defende, entretanto, o uso sensato de ensaios de laboratório em pequena escala trabalhando junto com a prática.

Para desenvolver materiais, é necessário um melhor entendimento dos modos de deterioração encontrados (CLAYTON, 1996).

Diante do contexto acima, a proposta deste trabalho foi realizar ensaios de tribologia que representassem condições de contato do friso das rodas com o canto de bitola dos trilhos, que são típicas da EFVM, no intuito de conhecer os principais mecanismos de desgaste existentes nesta ferrovia.

Para isso, foram realizados ensaios tribológicos na configuração pino-disco com os materiais de trilho e rodas utilizados na ferrovia. Para confecção do pino, foi utilizado trilho perlítico de dureza superficial de 370 Brinell. Para os discos, foram utilizados materiais de rodas fundidas e forjadas da classe C da norma AAR (*Association of American Railroad*). Os ensaios aconteceram a seco, em temperatura ambiente e com monitoramento da umidade relativa do ar. Foram utilizadas duas velocidades de

deslizamento – 0,1 m/s e 0,9 m/s – e carga normal foi constante – 24,6N – de modo a garantir uma pressão nominal de contato máxima de 1,5 GPa.

No próximo capítulo serão abordados os conceitos básicos de tribologia, rodas e trilhos ferroviários, além de teorias e resultados encontrados na literatura existente sobre contato roda-trilho. A revisão é importante para o entendimento deste trabalho.

No capítulo 3 serão apresentados os materiais e métodos, com a especificação dos trilhos e rodas utilizados para confecção das amostras, desenhos dos pinos e discos e sua posição de retirada a partir dos trilhos e rodas, além de informações sobre os procedimentos usados para caracterização de pinos e discos, parâmetros dos ensaios – carga, velocidade de deslizamento, tempo de ensaio, raio da pista desgastada, temperatura e umidade relativa – e métodos de avaliação do desgaste e mecanismos de desgaste de pinos e discos.

No quarto capítulo serão expostos e discutidos os resultados obtidos, comparando-os para as condições estabelecidas para o contato – diferentes velocidades de deslizamento e materiais do disco. As conclusões a respeito destes resultados serão apresentadas no capítulo 5.

Por fim, o sexto capítulo apontará as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. TRIBOLOGIA

Como explica Zum Gahr (1987), o termo “tribologia” é derivado da palavra grega “tribos”, que significa atrito, fricção. Hutchings (1992) e Dowson (1998) citam a definição do relatório do Departamento de Educação e Ciência do Reino Unido (1966), feita pelo Dr. Peter Jost, para definir tribologia como “a ciência e tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo e suas práticas relacionadas”. Para Bushan (2001), tribologia é “o estudo da interação entre superfícies em contato”. Ainda segundo Hutchings (1992), tribologia é a ciência que estuda os diferentes tipos de atrito, lubrificação e desgaste. Neste trabalho, atrito e desgaste foram os temas estudados.

2.2. ATRITO

Definido por Hutchings (1992) como a “resistência encontrada por um corpo em movimento sobre outro”, o atrito pode ser dividido em duas classes: deslizamento e rolamento, como mostra a Figura 2.1. Em ambos os casos, é necessária a aplicação de uma força (F) para mover o corpo sobre a superfície. A relação entre esta força e a carga normal (W) é dada pelo coeficiente de atrito (μ), logo, quanto maior o coeficiente de atrito, maior deverá ser a força (F) para vencer a resistência do atrito ao movimento do corpo (μ = F/W).

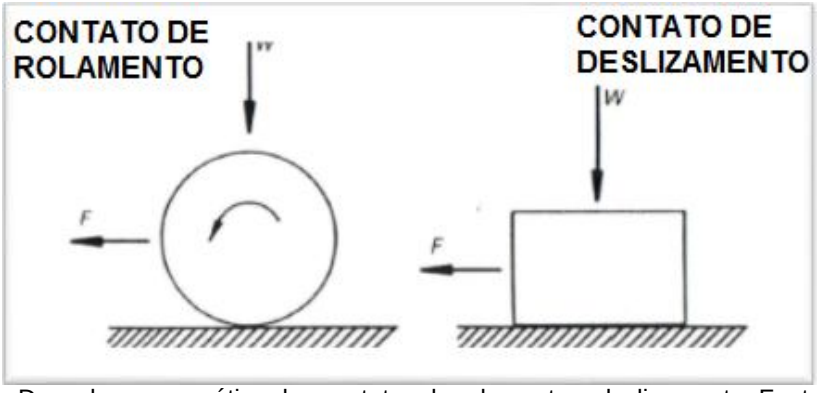


Figura 2.1 – Desenho esquemático dos contatos de rolamento e deslizamento. Fonte: adaptado de (HUTCHINGS, 1992).

No contato de deslizamento, o coeficiente de atrito depende de três mecanismos principais: deformação das asperezas, adesão das superfícies deslizantes e

sulcamento causado por partículas duras ou asperezas (SUH e SIN, 1982, *apud* LEWIS e OLOFSSON, 2009). Geralmente, em pares metálicos, o coeficiente de atrito em contato não lubrificado varia entre 0,3 e 1,0 (CZICHOS, 1992, *apud* LEWIS e OLOFSSON, 2009). O atrito no contato de rolamento não lubrificado é muito menor do que no deslizamento, ficando o coeficiente de atrito geralmente na ordem de 1×10^{-4} (HARRIS, 1991, *apud* LEWIS e OLOFSSON, 2009).

De acordo com os modelos de Reynolds e Heathcote, não existe na prática rolamento puro entre dois materiais, ou seja, para qualquer contato de rolamento, haverá também deslizamento, ainda que em pequena porção (HUTCHINGS, 1992). Isso se confirma no estudo do contato roda-trilho, com o microescorregamento (*creepage*) existente no contato do passeio das rodas com o topo dos boletos dos trilhos, assunto mais explorado na seção do Contato Roda-Trilho.

2.3. DESGASTE

Bushan (2001) define desgaste como “o fenômeno de remoção de material da superfície devido à interação com a outra superfície do par”. Para a norma ASTM G40-13 (2013), desgaste é a alteração provocada em uma superfície sólida por perda ou deslocamento de material, devido ao movimento relativo entre esta superfície e uma ou mais substâncias. Não é uma propriedade do material, sim do sistema. As taxas de desgaste podem variar dependendo das condições de contato, por exemplo: material, velocidade de deslizamento, pressão de contato, forma, umidade, lubrificação, entre outros (STACHOWIAK, 2006).

Zum Gahr (1987) lista adesão, abrasão, fadiga superficial e reações triboquímicas como os principais mecanismos de desgaste, apresentados na Figura 2.2.

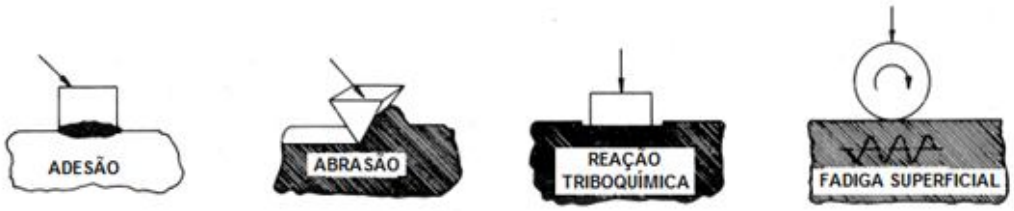


Figura 2.2 – Desenho esquemático dos principais mecanismos de desgaste. Fonte: adaptado de (ZUM GAHR, 1987).

Zum Gahr (1987) descreve os quatro mecanismos:

- Adesão: formação e ruptura de ligações adesivas interfaciais. Por exemplo: micro soldas entre asperezas;
- Abrasão: remoção de material devido a riscamento;
- Fadiga superficial: fadiga e formação de trincas na superfície devido a ciclos de tensão de contato que resultam em separação do material;
- Reações triboquimicas: formação de produtos de reações químicas como resultado das interações químicas entre os elementos de um tribossistema, iniciadas por ações tribológicas.

O modo dominante de desgaste de um tribossistema pode variar devido a diferentes razões, como mudanças nas propriedades superficiais do material causadas por aquecimento com o atrito, formação de filmes químicos (oxidação) e o desgaste propriamente dito (BUSHAN, 2001).

Diferentes processos de desgaste podem gerar os mecanismos citados. Um deles é o desgaste por deslizamento, objeto de estudo desta pesquisa.

2.3.1. Desgaste por deslizamento

Quando uma superfície de desgaste desliza sobre a outra, ocorrerá desgaste em uma ou ambas (HUTCHINGS, 1992). A definição de desgaste por deslizamento está relacionada com o tipo de contato, não representando um mecanismo de desgaste na visão científica (BUSHAN, 2001), podendo causar os mecanismos citados por Zum Gahr (1987): adesão, abrasão, fadiga superficial e reações triboquímicas.

Hutchings (1992) cita a equação de Archard para o cálculo da severidade do desgaste por deslizamento:

$$Q = \frac{KW}{H} \qquad (2.1)$$

Onde: Q é a quantidade de material “removido” em mm³ por unidade de deslizamento; W é a força normal em Newton (N) aplicada à superfície; H é a dureza Vickers da superfície mais macia e K é o coeficiente adimensional de desgaste (SANTOS *et al*, 2012).

Volume desgastado, rugosidade da superfície desgastada e partículas de desgaste (*debris*) fornecem importantes informações para caracterizar o desgaste. O grau de desgaste é descrito pela taxa de desgaste (mm^3 / m), pelo coeficiente de desgaste adimensional 'K' ou pelo coeficiente de desgaste dimensional *'k'* (mm^3 / N.m) (BUSHAN, 2001).

2.4. RODA

Freitas (2015) define as rodas como os "componentes responsáveis por transmitir o movimento ao vagão, além de suportar todo o seu peso e solicitações causadas pela frenagem e irregularidades da via".

São compostas basicamente por pista de rolamento (ou passeio da roda), friso, aro, disco e cubo (FREITAS, 2015), conforme apresentado na Figura 2.3.

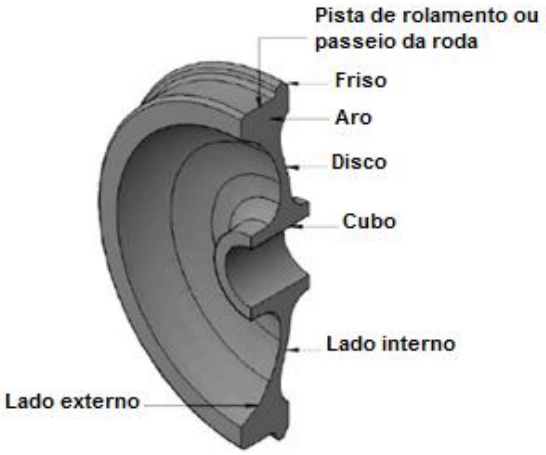


Figura 2.3 – Desenho esquemático de uma roda ferroviária. Fonte: adaptado de (FREITAS, 2015).

A norma AAR (2014) determina os requisitos de composição química de rodas ferroviárias de acordo com as diferentes classes, listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição química, em peso, das rodas ferroviárias, por classe.

Elemento	Classe L	Classe A	Classe B	Classe C
C [%]	**Máx. 0,47**	**0,47-0,57**	**0,57-0,67**	**0,67-0,77**
Mn [%]	**0,60-0,90**	**0,60-0,90**	**0,60-0,90**	**0,60-0,90**
P [%]	**Máx. 0,03**	**Máx. 0,03**	**Máx. 0,03**	**Máx. 0,03**
S [%]	**0,005-0,040**	**0,005-0,040**	**0,005-0,040**	**0,005-0,040**
Si [%]	**0,15-1,00**	**0,15-1,00**	**0,15-1,00**	**0,15-1,00**

Elementos Residuais				
Ni [%]	**Máx. 0,25**	**Máx. 0,25**	**Máx. 0,25**	**Máx. 0,25**
Cr [%]	**Máx. 0,25**	**Máx. 0,25**	**Máx. 0,25**	**Máx. 0,25**
Mo [%]	**Máx. 0,10**	**Máx. 0,10**	**Máx. 0,10**	**Máx. 0,10**
V [%]	**Máx. 0,04**	**Máx. 0,04**	**Máx. 0,04**	**Máx. 0,04**
Cu [%]	**Máx. 0,35**	**Máx. 0,35**	**Máx. 0,35**	**Máx. 0,35**
Al [%]	**Máx. 0,06**	**Máx. 0,06**	**Máx. 0,06**	**Máx. 0,06**
Ti [%]	**Máx. 0,03**	**Máx. 0,03**	**Máx. 0,03**	**Máx. 0,03**
Nb [%]	**Máx. 0,05**	**Máx. 0,05**	**Máx. 0,05**	**Máx. 0,05**

Fonte: adaptado da norma AAR (2014)

Rodas ferroviárias podem ser fabricadas pelos processos de fundição ou forjamento. Independente do processo de fabricação, a norma AAR (2014) determina que é necessário realizar têmpera superficial na região do passeio da roda, com o objetivo de gerar tensões residuais compressivas. Tais tensões, segundo Colpaert (2008), inibem o crescimento de possíveis trincas no sentido radial da roda. A microestrutura esperada para rodas ferroviárias é tipicamente de perlita fina (FREITAS, 2015).

Maia *et al* (2010) compararam a microestrutura de rodas forjadas classe C com diferentes parâmetros de tratamento térmico. Nas rodas que sofreram resfriamento mais rápido, foi observada martensita revenida na superfície, enquanto que aquelas cujo resfriamento foi mais lento, a microestrutura observada foi de perlita e ferrita. As imagens são apresentadas na Figura 2.4.

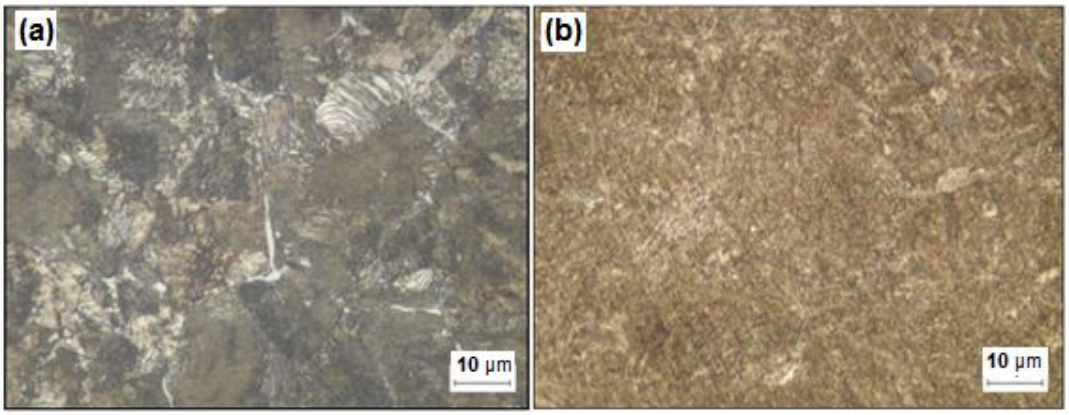


Figura 2.4 – Microestruturas de rodas ferroviárias forjadas classe C com (a) resfriamento lento – perlita e ferrita (b) resfriamento rápido – martensita revenida. Fonte: adaptado de (MAIA *et al*, 2010).

Freitas (2015) comparou as microestruturas de rodas fundidas e forjadas classe C da norma AAR. Confirmou a presença majoritária da perlita em ambas e observou uma menor quantidade de ferrita nos contornos de grão da roda fundida, como mostra a Figura 2.5, que pode estar associada à menor quantidade de elementos ferritizantes (Cr e Mo).

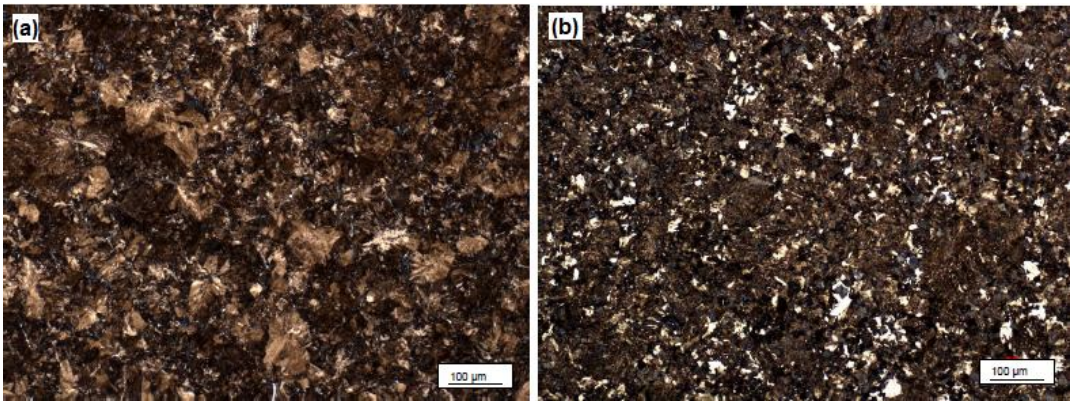


Figura 2.5 – Microestruturas de rodas ferroviárias classe C (a) fundida e (b) forjada. Fonte: adaptado de (FREITAS, 2015).

He *et al* (2016) e Zeng *et al* (2016) confirmaram em suas pesquisas a presença de ferrita e perlita na microestrutura de rodas ferroviárias, neste caso com composição química similar à da classe A da norma AAR, como pode ser visto na Figura 2.6.

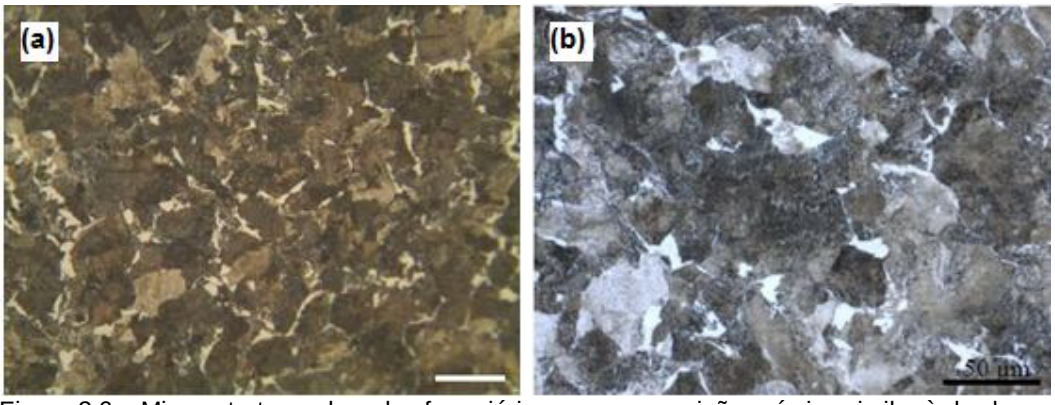


Figura 2.6 – Microestruturas de rodas ferroviárias com composição química similar à da classe A da norma AAR. Fontes: (a) adaptado de (HE *et al,* 2016) e (b) adaptado de (ZENG *et al*, 2016).

Chaves (2017) observou a presença de bainita e perlita na microestrutura de rodas ferroviárias classe C, em regiões próximas à superfície, como pode ser visto na Figura 2.7. Na parte interna das rodas, foi observada a presença somente de perlita.

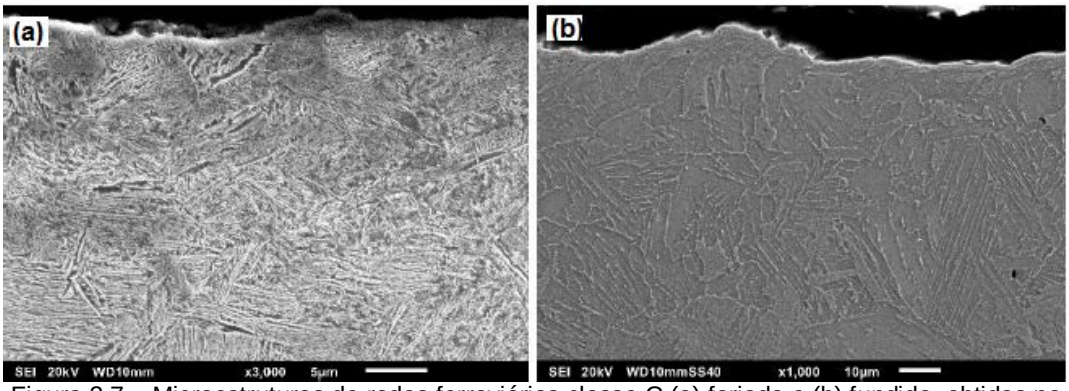


Figura 2.7 – Microestruturas de rodas ferroviárias classe C (a) forjada e (b) fundida, obtidas no MEV. Fonte: adaptado de (CHAVES, 2017).

2.5. TRILHO

Na superestrutura da via permanente, os trilhos constituem a superfície de rolamento para as rodas de vagões, locomotivas e demais veículos ferroviários, servindo como guia para os mesmos (SEMPREBONE, 2005). O perfil básico de trilhos ferroviários convencionais, exibido na Figura 2.8, é o tipo *Vignole*, composto por alma, boleto e patim (MACÊDO, 2009).

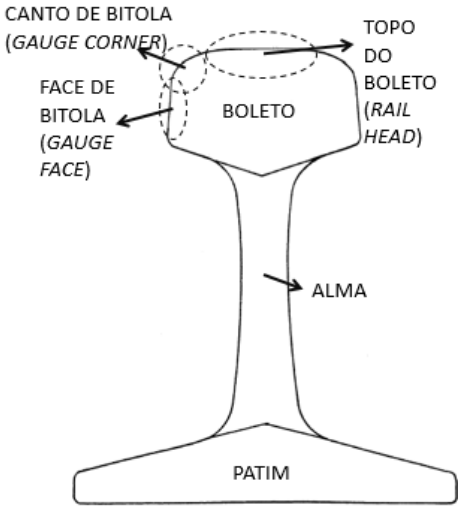


Figura 2.8 – Desenho esquemático de trilho convencional *Vignole* e sua terminologia. Fonte: adaptado da norma AREMA (2014).

A norma AREMA (*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*) especifica a composição química dos trilhos convencionais, que devem ter entre 0,74% e 0,86% de carbono, além de outros elementos de liga, conforme exposto na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Composição química, em peso, de trilhos convencionais.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	V [%]	Al [%]
0,74-0,86	**0,75-1,25**	**0,10-0,60**	**Máx. 0,02**	**Máx. 0,02**	**Máx. 0,30**	**Máx. 0,25**	**Máx. 0,06**	**Máx. 0,01**	**Máx. 0,01**

Fonte: adaptado da norma AREMA (2014).

Ainda segundo a norma AREMA (2014), a microestrutura desejada para os trilhos convencionais é 100% perlítica. Caso haja formação de martensita não revenida, a qualidade da solda é prejudicada.

Macedo *et al* (2001) analisaram um trilho ferroviário convencional, padrão AREMA, e identificaram a presença de microestrutura perlítica, revelada na Figura 2.9, assim como era esperado.

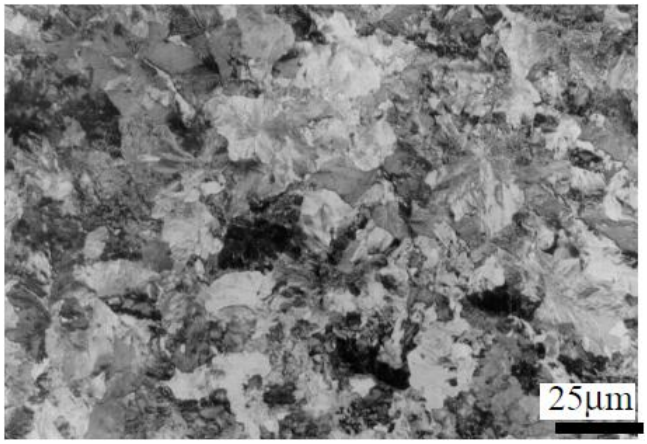


Figura 2.9 – Microestrutura de trilho padrão AREMA. Fonte: adaptado de (MACEDO *et al,* 2001).

2.6. CONTATO RODA-TRILHO

Rodeiros convencionais consistem de duas rodas montadas em um eixo rígido. Rodas geralmente tem o perfil do passeio cônico com o friso na parte de dentro dos eixos. Os rodeiros trafegam inclinados sobre os boletos dos trilhos, devido a este perfil cônico, e a folga existente entre o friso da roda e o canto de bitola do trilho permite o deslocamento lateral do rodeiro até que ocorra o contato entre ambos. As formas das rodas e trilhos influenciam na estabilidade dinâmica dos veículos, interações do contato roda-trilho, pressão de contato e características de desgaste (SHEVTSOV, 2008). A Figura 2.10 ilustra o contato entre roda e trilho.

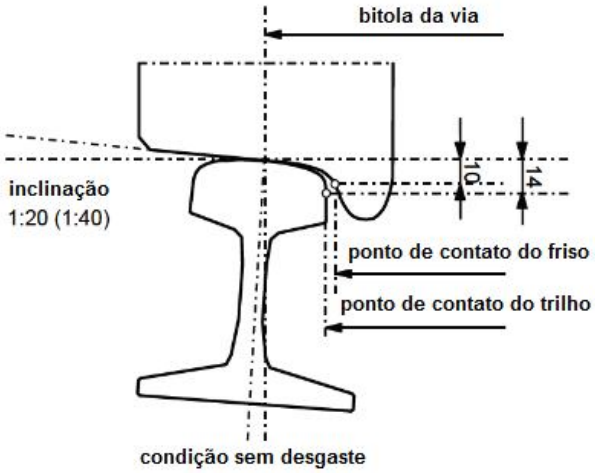


Figura 2.10 – Desenho esquemático do contato da roda com o trilho. Fonte: adaptado de (SHEVTSOV, 2008).

O contato mecânico entre roda e trilho, geralmente em torno de 1 cm² de área, muda continuamente com o tráfego do trem pela ferrovia. A posição exata do contato depende dos perfis de rodas e trilhos (novos e desgastados), raio das curvas, posição do rodeiro no truque e outros fatores que dependem do desenho e condição de manutenção dos truques ferroviários. Em tangentes (retas), o contato típico fica entre o topo do boleto do trilho e o passeio da roda. Para curvas mais fechadas, o contato tende a acontecer entre o canto de bitola do trilho e o friso da roda (LEWIS e OLOFSSON, 2009). A Figura 2.11 mostra as posições de contato e variações de tensão típicas para um rodeiro de ataque em curva para a direita:

Figura 2.11 – Desenho esquemático do rodeiro de ataque em curva para direita. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2009).

As zonas de contato possíveis da roda no trilho são exibidas na Figura 2.12.

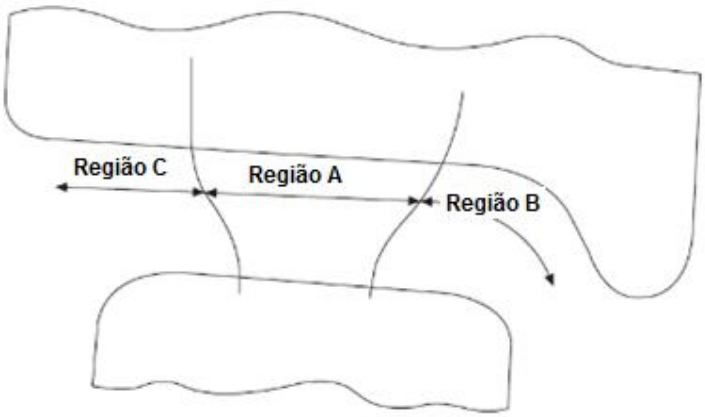


Figura 2.12 – Desenho esquemático das zonas de contato roda-trilho. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2009).

- Região A – passeio da roda e topo do boleto: geralmente ocorre em tangentes ou curvas com raios muito grandes. Nesta região ocorrem as menores tensões de contato e forças laterais;
- Região B – friso da roda e canto de bitola do trilho: área de contato muito menor do que na região A, provocando maiores tensões de contato e taxas de desgaste. Por vezes, o desgaste acentuado combinado com escoamento plástico promove duas regiões de contato no par roda-trilho, ocorrendo o contato no passeio e no friso da roda;
- Região C – lado externo do passeio da roda e lado de campo do trilho: menos comum de ocorrer, envolve altas tensões de contato que tendem a promover desgaste irregular da roda e possivelmente afetam negativamente a dinâmica de condução do rodeiro.

A solução mais simples para se determinar a área de contato entre roda e trilho é utilizar a teoria de Hertz (LEWIS e OLOFSSON, 2009).

2.6.1. Teoria de Hertz

Em 1882, Heinrich Hertz publicou no seu artigo "*On the contact of elastic solids*" os primeiros estudos a respeito do contato mecânico entre dois sólidos. Verificou que duas lentes de vidro cilíndricas posicionadas uma contra a outra sob carregamento constante promoviam uma área de contato elíptica, assim como apresentado na Figura 2.13 (JOHNSON, 1985).

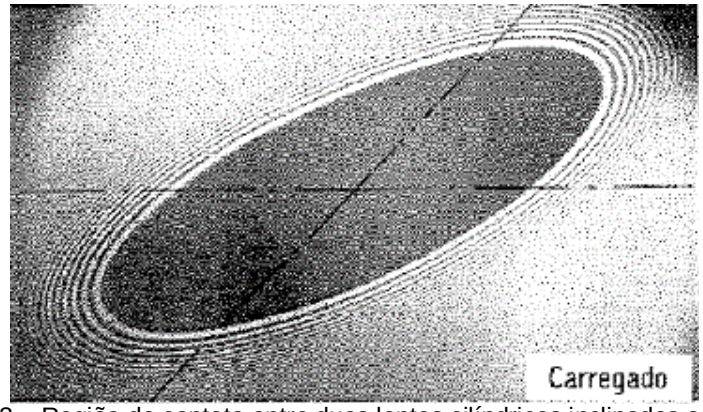


Figura 2.13 – Região de contato entre duas lentes cilíndricas inclinadas a 45° e com carregamento. Fonte: (SANTOS, 2000).

A teoria de contato proposta por Hertz só começou a ser difundida em meados do século XX, quando pesquisadores das áreas de ferrovia, redutores de engrenagens e indústria de rolamentos perceberam sua importância. Especificamente na ferrovia, a teoria é de suma importância para o estudo do contato roda-trilho, tema que não chegou a ser abordado por Hertz (SANTOS, 2000).

Segundo a teoria de Hertz, quando dois corpos convexos são postos em contato e é aplicada uma carga, surge uma área de contato cilíndrica. No contato roda-trilho, rodas e trilhos são modelados como se fossem cilindros, com os eixos principais perpendiculares entre si. Com a aplicação de carga vertical, os corpos sólidos se deformam, formando a área de contato indicada na Figura 2.14 (SANTOS, 2000).

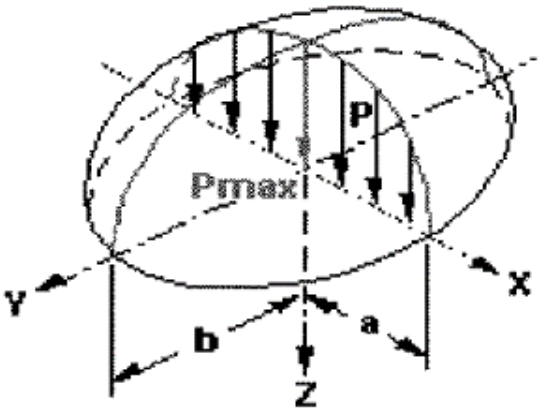


Figura 2.14 – Desenho esquemático da elipse de contato e distribuição de pressão no contato roda-trilho. Fonte: (SANTOS, 2000).

A pressão de contato máxima (P) para o sistema roda-trilho pode ser obtida através da solução mais simples da análise de Hertz (LEWIS e OLOFSSON, 2009):

$$P = \sqrt[3]{\frac{3WE^2}{2\pi^3 R^2 (1-\nu^2)^2}} \qquad (2.2)$$

Onde:

W = carga normal;

E = módulo de Young;

ν = coeficiente de Poisson;

R = raio equivalente, dado por:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \qquad (2.3)$$

Onde: R_1 e R_2 são os raios da roda e trilho, respectivamente.

Há uma boa correlação entre a pressão de contato calculada pela teoria de Hertz e a real do contato roda-trilho, obtida através de ensaio de ultrassom (LEWIS e OLOFSSON, 2009). A Figura 2.15 exibe os mapas de pressão citados.

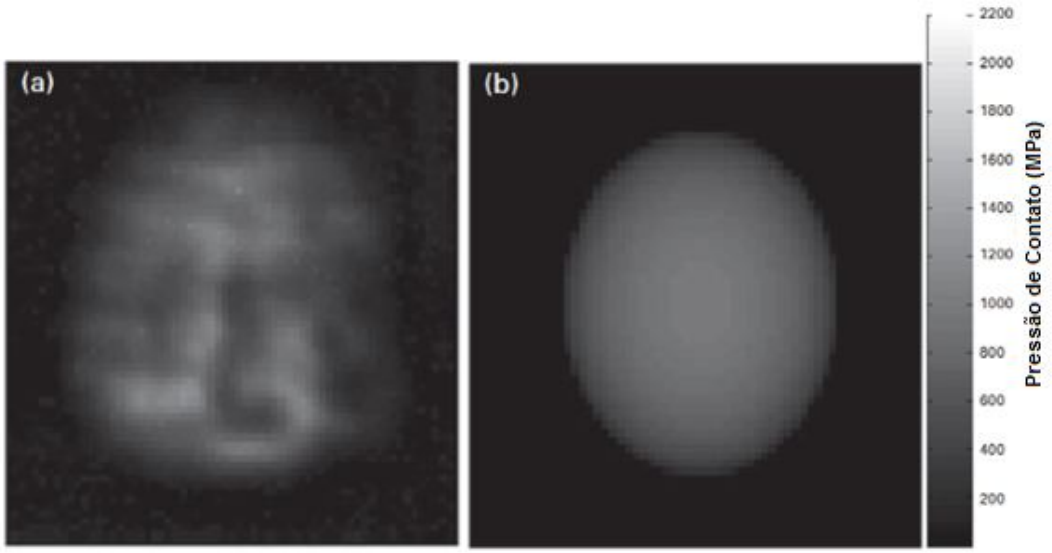


Figura 2.15 – Mapas de pressão de contato para carregamento de 80 kN: (a) medição ultrassônica e (b) teoria de Hertz. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2009).

Hutchings (1992) cita a equação de Hertz para a área do contato elástico entre uma esfera e um plano, útil para os ensaios em laboratório, dada por:

$$\pi a^2 \simeq 0{,}83\pi \left(\frac{WR_e}{E}\right)^{2/3} \qquad (2.4)$$

Onde: W = carga normal aplicada; R_e = raio da esfera; E = módulo de elasticidade do aço; πa^2 = área de contato entre esfera e plano.

A pressão de contato pode então ser calculada por $P = W/\pi a^2$. A distribuição da pressão de contato ocorre de acordo com desenho esquemático da Figura 2.16.

Figura 2.16 – Desenho esquemático da distribuição da pressão de contato entre uma esfera carregada elasticamente contra um plano. Fonte: adaptado de (HUTCHNGS, 1992).

2.6.2. Microescorregamento (*creepage*)

Quando uma roda ferroviária rola sobre um trilho, este último provoca uma resistência ao rolamento da roda, ainda que pequeno. Isso ocorre devido à deformação relativa das superfícies: compressão na roda e alongamento do trilho logo após o primeiro contato. Aparece neste momento a resistência ao rolamento (atrito) e a adesão da roda ao trilho. Imediatamente após o movimento, a região da roda que estava comprimida se alonga e o trilho alongado se comprime, havendo então escorregamento, como mostrado na Figura 2.17 (KALKER, J. J., 1967, *apud* SANTOS, 2000). Este comportamento está de acordo com o modelo de Reynolds (HUTCHINGS, 1992).

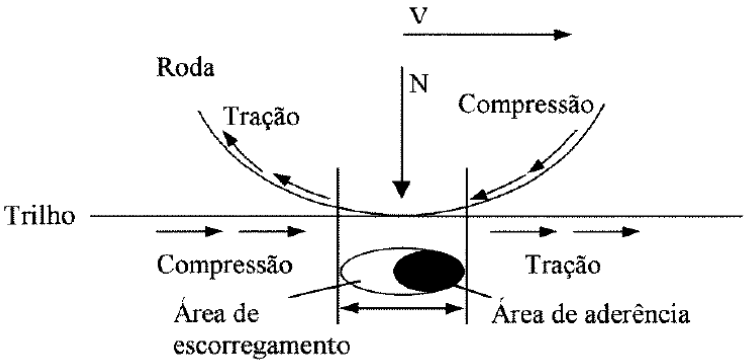


Figura 2.17 – Aderência e escorregamento devido às deformações elásticas. Fonte: (KALKER, J. J., 1967, *apud* SANTOS, 2000).

O contato entre roda e trilho se divide entre estas duas regiões de adesão (*stick*) e deslizamento (*slip*). Este deslizamento na zona de contato é conhecido por *creepage* (ou microescorregamento) longitudinal. Com o aumento da força trativa, aumenta também a região de deslizamento até que a zona de adesão suma por completo, havendo deslizamento puro (LEWIS e OLOFSSON, 2009).

Santos (2000) define o microescorregamento longitudinal (ξ_x) como "a diferença entre as velocidades dos dois corpos em contato, normalizado pela média das velocidades dos dois corpos".

$$\xi_{x} = \frac{V_1 - V_2}{{}^{1}/_{2}(V_1 - V_2)} \qquad (2.5)$$

Além do microescorregamento longitudinal (ξ_x), que ocorre na direção do rolamento, Santos (2000) define o microescorregamento lateral (ξ_y) – transversal ao rolamento – e o *spin*, que é a rotação de dois corpos ao redor de um eixo normal ao plano de contato.

Para o cálculo do microescorregamento na visão de rodas e trilhos, são consideradas a velocidade de translação (Vt), que é igual à velocidade do vagão, e a velocidade circunferencial – Vc = ωR. Devido à conicidade das rodas, o vagão faz um movimento ondulatório sobre os trilhos, ocorrendo deslizamento, o que por consequência impede que o valor da velocidade circunferencial seja igual ao da velocidade de translação (SANTOS, 2000).

O microescorregamento lateral (ξ_y) está ligado ao ângulo de ataque do rodeiro (α), indicado na Figura 2.18, que provoca deslocamentos laterais nas rodas (SANTOS, 2000).

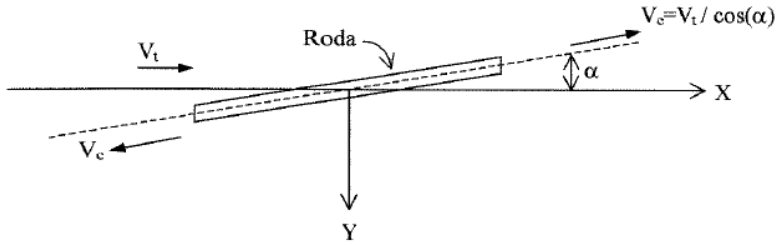


Figura 2.18 – Vista superior de uma roda trafegando sobre trilho, com as velocidades e ângulo de ataque. Fonte: (SANTOS, 2000).

O *spin* (ξsp) é resultado da conicidade da roda (θ), exibido na Figura 2.19. A velocidade angular do rodeiro não é paralela ao plano de contato devido à essa conicidade, como pode ser visto na Figura 2.19. Logo, há um componente de rotação em relação ao eixo z (SHEVTSOV, 2008).

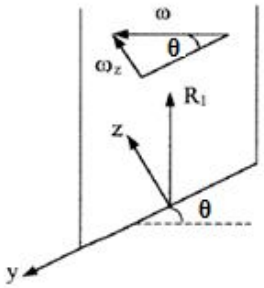


Figura 2.19 – *Spin* devido à conicidade da roda. Fonte: adaptado de (SANTOS, 2000).

Os coeficientes de microescorregamento longitudinal, lateral e *spin*, ilustrados na Figura 2.20, são então (SANTOS, 2000):

$$\xi_x = \frac{(|V_t| - |V_c|)}{V_m} \qquad (2.6)$$

$$\xi_y \tilde{\sim} \alpha \qquad (2.7)$$

$$\xi_{sp} = \frac{sen\ (\theta)}{R_1} \qquad (2.8)$$

Onde: Vt = velocidade de translação; Vc = velocidade circunferencial; Vm = Velocidade média = (Vt + Vc)/2; α = ângulo de ataque da roda no trilho; θ = conicidade da roda e R1 = raio da roda.

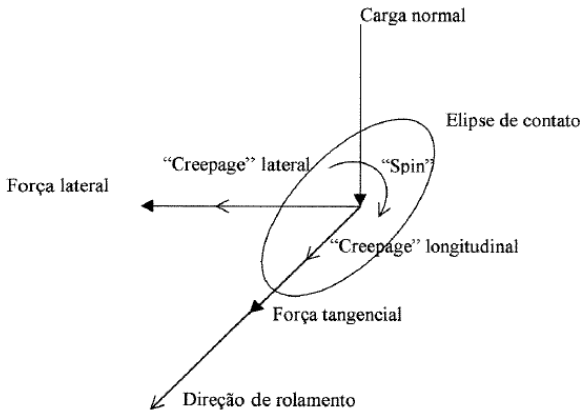


Figura 2.20 – Forças tangenciais e microescorregamento na região de contato. Fonte: (SANTOS, 2000).

2.7. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Até a década de 1970, a prática mais comum nas pesquisas para o desenvolvimento de materiais mais resistentes ao desgaste era a realização de testes em campo. Este tipo de teste traz consigo alguns inconvenientes: são demorados, há geralmente uma certa dificuldade para coleta de dados e os resultados podem ser afetados pelas diversas variáveis que influenciam o comportamento do desgaste em serviço (BOLTON e CLAYTON, 1984). Uma alternativa aos testes de campo é a realização de testes acelerados em escala real, que geram informações valiosas, porém são muito caros quando comparados aos ensaios em laboratório (DANKS e CLAYTON, 1987).

Ensaios em laboratórios podem produzir o desgaste com as mesmas características do existente no contato do friso da roda com o canto de bitola (DANKS e CLAYTON, 1987). A vantagem, além do menor custo, é que esta abordagem permite controle do tribossistema, por meio da determinação e isolamento das diversas variáveis (BOLTON e CLAYTON, 1984).

Entre o final da década de 1970 e início dos anos 1980, vários pesquisadores conduziram ensaios em laboratório para estudar desgaste do contato de rolamento entre roda e trilho. Na visão de Bolton e Clayton (1984), todos esses autores mostraram pouca evidência de correlação dos mecanismos de desgaste obtidos em laboratório com os encontrados no campo. Conseguir esta correlação dos mecanismos de desgaste vistos em laboratório com o desgaste lateral de trilhos foi o grande mérito de sua pesquisa.

Outro resultado importante do trabalho de Bolton e Clayton (1984) foi a reavaliação da terminologia utilizada para os mecanismos de desgaste, devido à descoberta de um terceiro regime. Os termos “moderado” e “severo” estavam sendo usados até então para distinguir dois regimes de desgaste em lados opostos de uma transição, o que não estava de acordo com o conceito original de desgaste moderado, cuja classificação deveria ser feita em termos do tamanho dos *debris*, rugosidade da superfície desgastada e coeficiente de atrito. Para diferenciar os termos e evitar a confusão na sua utilização, os três regimes de desgaste observados foram denominados: tipo I, tipo II e tipo III (BOLTON e CLAYTON, 1984).

2.7.1. Trabalho de Bolton e Clayton

Bolton e Clayton (1984) trabalharam com ensaios de desgaste na configuração *twin disc*. Dois discos em contato de rolamento foram montados em eixos com diferentes velocidades de rotação – eixo inferior 1,104 vezes mais rápido que o inferior – gerando também escorregamento (*creepage*), de acordo com a equação abaixo:

$$\gamma = \frac{2(1{,}104D_2 - D_1)}{D_1 + 1{,}104D_2} \qquad (2.9)$$

Onde: γ = escorregamento; D_1 = diâmetro do disco superior e D_2 = diâmetro do disco inferior.

Os discos superiores foram fabricados com diferentes materiais de trilhos e tinham 35 mm de diâmetro, enquanto os inferiores foram fabricados com um mesmo material de roda e tinham diâmetros variados, para produzir assim diferentes níveis de escorregamento. A pressão nominal de contato máxima foi calculada a partir da Teoria de Hertz (BOLTON e CLAYTON, 1984). Como o escorregamento é gerado também pela diferença de diâmetros, ele varia durante os ensaios, devido ao desgaste dos discos.

A Tabela 2.3 apresenta a composição química dos materiais ensaiados por Bolton e Clayton (1984).

Tabela 2.3 – Composição química dos materiais ensaiados por Bolton e Clayton:

Elemento	BS11 - trilho	UICA - trilho	UICB - trilho	1% Cr - trilho	Roda perlítica
C [%]	0,53	0,73	0,62	0,70	0,65
Si [%]	0,26	0,26	0,22	0,14	0,24
Mn [%]	1,07	1,06	1,48	1,18	0,71
S [%]	0,024	0,026	0,023	0,029	0,046
P [%]	0,021	0,009	0,022	0,024	0,026
Ni [%]	0,02	0,01	0,01	0,01	0,15
Cr [%]	0,01	0,01	0,01	1,08	0,18
Mo [%]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
Cu [%]	-	-	-	-	0,26
Sn [%]	-	-	-	-	0,031

Fonte: adaptado de (BOLTON E CLAYTON, 1984).

Condições de contato muitos distintas puderam ser observadas nos ensaios realizados por Bolton e Clayton (1984), com o escorregamento variando entre 1% e 35% e a tensão de contato entre 500 MPa e 1300 MPa. Assim, 3 diferentes regimes de desgaste foram observados. O regime de desgaste tipo I ficou caracterizado pela formação de óxidos somada ao desgaste por desplacamento de *debris* metálicos associados a inclusões de sulfetos de manganês altamente deformadas. Estas inclusões foram removidas como trincas na direção paralela à direção de deformação. Com o auxílio de microscopia óptica, observou-se a formação de plaquetas relativamente grandes e finas – geralmente de aproximadamente 100 µm de comprimento e 2 a 3 µm de espessura, como pode ser verificado na Figura 2.21.

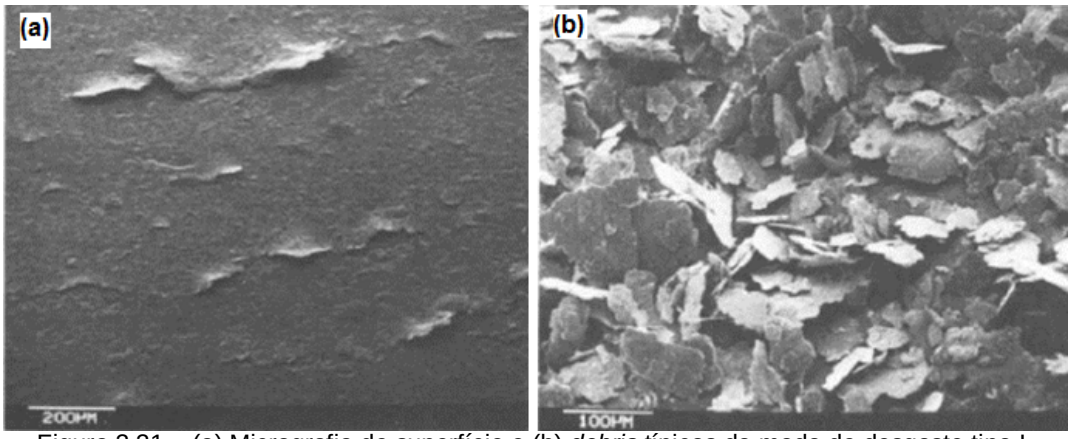


Figura 2.21 – (a) Micrografia de superfície e (b) *debris* típicos do modo de desgaste tipo I.
Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).

No modo de desgaste tipo II os *debris* formados foram totalmente metálicos. Como mostra a Figura 2.22, as partículas eram mais rugosas e, na média, muito menores do que aquelas encontradas no tipo I. Houve, entretanto, uma grande variação no tamanho dos *debris*, que em muitas vezes se compactaram, formando compostos de até 50 µm de espessura. Não foram observadas trincas ou plaquetas em quantidade significativa, sugerindo remoção do *debris* por inteiro a cada ciclo de carregamento. Bolton e Clayton (1984) sugeriram a presença de processos de deformação plástica e fratura. Houve transferência metálica entre os discos, indicando a ocorrência de um processo adesivo, que não necessariamente foi responsável pela formação das partículas de desgaste.

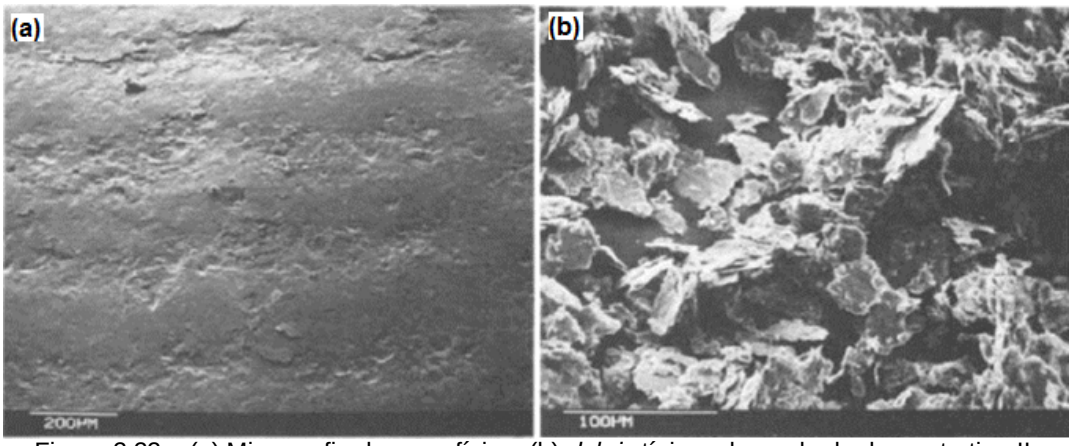


Figura 2.22 – (a) Micrografia de superfície e (b) *debris* típicos do modo de desgaste tipo II.
Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).

No regime tipo III, apresentado na Figura 2.23, as superfícies desgastadas ficaram muito rugosas, quando comparadas às dos modos I e II, havendo evidências de arrancamento de grandes partículas da superfície, assim como trilhas de sulcamento muito profundas. A maioria dos *debris* observados eram muito pequenos (< 10 μm de comprimento) e tinham formato irregular. A morfologia de plaquetas somente foi encontrada nas maiores partículas (200-300 μm de comprimento), que apresentaram *score marks* (marcas de riscamento) visíveis. Processo similar de remoção de material havia sido encontrado por Clayton (1977, *apud* BOLTON e CLAYTON, 1984) em ensaios de deslizamento puro anteriores, realizados na configuração pino-anel, com ocorrência de fratura iniciada a partir de deformações subsuperficiais, propagação da trinca paralela a estas deformações e remoção das partículas quando a trinca atinge a superfície.

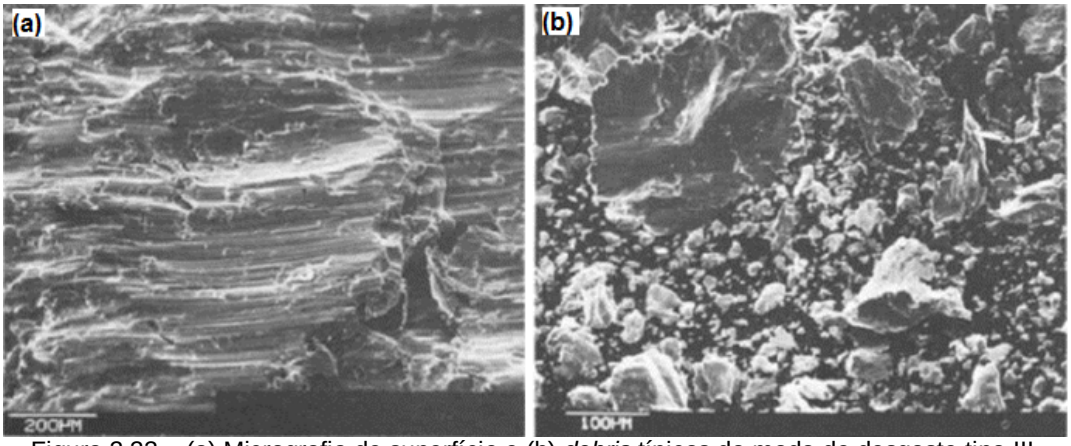


Figura 2.23 – (a) Micrografia de superfície e (b) *debris* típicos do modo de desgaste tipo III.
Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).

O mérito da pesquisa de Bolton e Clayton (1984) não foi somente caracterizar o desgaste para as condições de contato estudadas em laboratório, mas também correlacioná-las com verificação de campo. Para isso, examinaram em Microscópio Eletrônico de Varredura e Microscópio Óptico amostras de trilhos desgastados retirados de 4 diferentes trechos da ferrovia britânica (*British Rail*). Os resultados foram transcritos de acordo com as regiões indicadas com o perfil típico de desgaste da Figura 2.24.

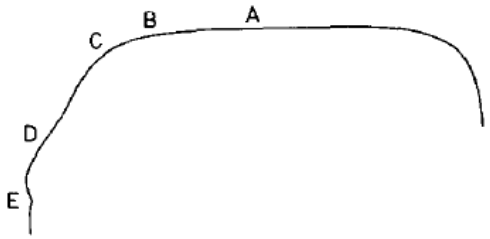


Figura 2.24 – Desenho esquemático do perfil típico de trilho desgastado. Fonte: (BOLTON e CLAYTON, 1984).

A região entre os pontos A e C foi definida por Bolton e Clayton (1984) como canto de bitola dos trilhos – na prática ferroviária atual, a região de canto de bitola estaria entre os pontos B e D. A observação desta região em trilhos mostrou pequena ocorrência de partículas com morfologia de plaquetas e não houve evidência de formação de *debris* óxidos, assim uma possível correlação com o tipo I de desgaste foi descartada. A ausência de sulcamento e de *score marks* excluíram o desgaste tipo III. Como conclusão, o processo de desgaste nesta região foi relacionado ao tipo II verificado em laboratório. Já a região entre C e D foi definida como face de bitola. Nela foram verificadas marcas profundas de sulcamento e *score marks*, logo o mecanismo de desgaste foi associado ao tipo III.

No regime tipo I, Bolton e Clayton (1984) correlacionaram as taxas de desgaste com a pressão nominal de contato. As taxas, tanto dos materiais de trilhos quanto da roda, ficaram maiores com o aumento do escorregamento. Em geral, o desgaste dos discos confeccionados com o material da roda sofreu pouca ou nenhuma influência dos diferentes materiais de trilhos. Já as taxas de desgaste dos discos de diferentes tipos de trilho variaram entre si. Os resultados são apresentados nas Figuras 2.25 e 2.26.

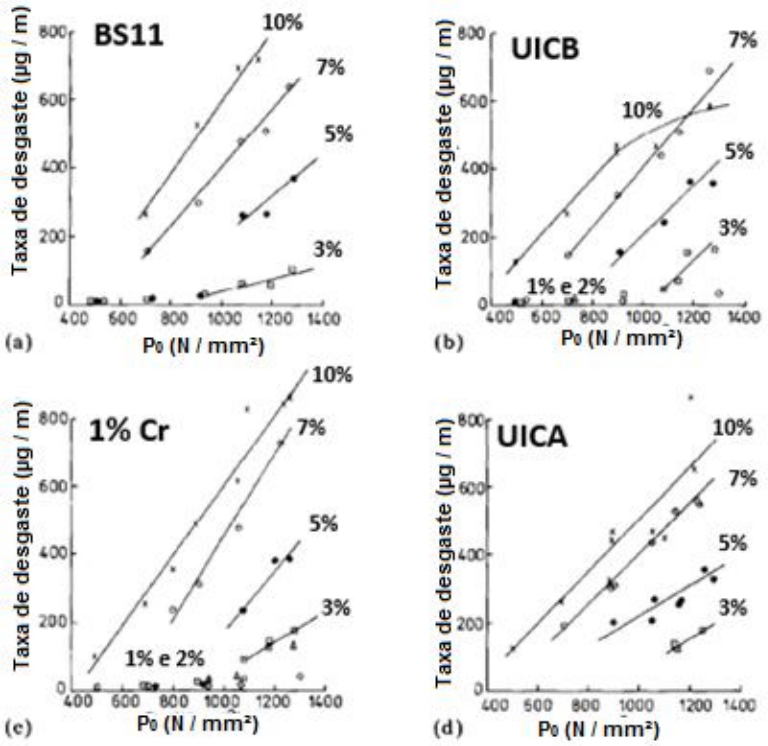


Figura 2.25 – Gráficos da taxa de desgaste vs. pressão de contato, em diferentes escorregamentos, para disco fabricado com material de roda em rolamento contra discos fabricados a partir de 4 diferentes tipos de trilho. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).

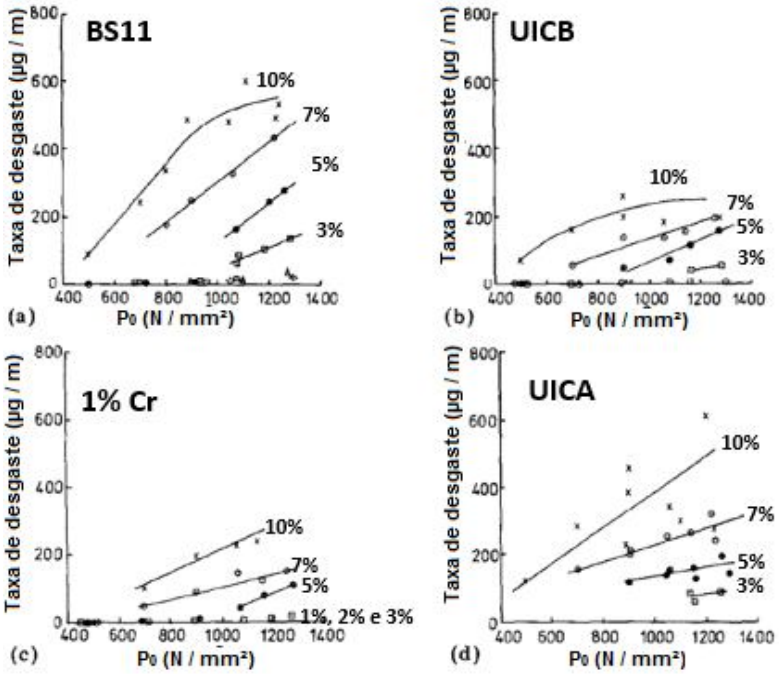


Figura 2.26 – Gráficos da taxa de desgaste vs. pressão de contato, em diferentes escorregamentos, para discos fabricados a partir de 4 diferentes tipos de trilho em rolamento contra disco fabricado com material de roda. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).

Para o regime tipo II, Bolton e Clayton (1984) correlacionaram taxas de desgaste com o parâmetro Tγ/A, onde 'T' é a força tangencial, 'γ' o escorregamento e 'A' é a área de contato nominal. Novamente, o desgaste das rodas sofreu pouca influência dos diferentes tipos de trilhos, tendo ocorrido uma relação constante entre as taxas de desgaste e o parâmetro Tγ/A. Assim como aconteceu no regime de desgaste tipo I, as taxas de desgaste dos trilhos foram diferentes de acordo com cada material, como mostra a Figura 2.27.

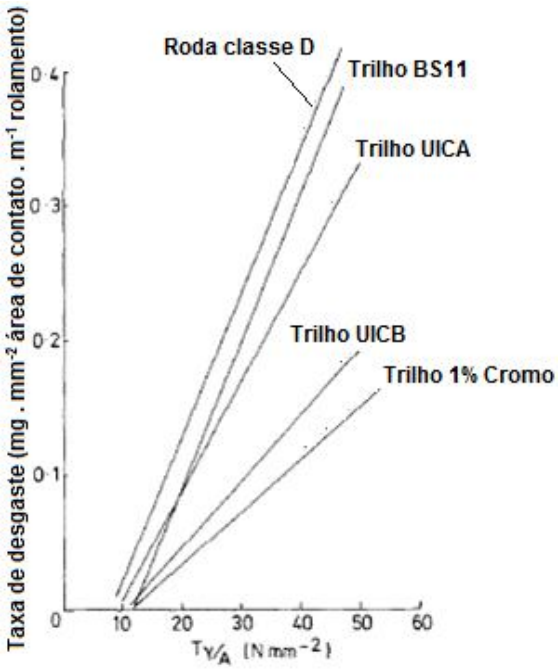


Figura 2.27 – Gráfico das taxas de desgaste vs. Tγ/A para os discos de roda e de diferentes tipos de trilho, no regime de desgaste tipo II. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).

No regime tipo III, a relação direta entre a taxa de desgaste e o parâmetro Tγ/A deixou de existir. Entretanto, o desempenho dos discos fabricados com material de trilhos perlíticos foi similar ao apresentado no regime tipo II, em se tratando das taxas de desgaste. A taxa de desgaste do disco fabricado com material da roda continuou a sofrer pouca influência do material do outro disco do par, quando se tratava de trilho perlítico (BOLTON e CLAYTON, 1984).

Bolton e Clayton (1984) avaliaram a influência do escorregamento na mudança do regime tipo II para o tipo III, sob um carregamento de 200 kgf. Verificaram que, nos discos fabricados a partir de trilhos perlíticos, a transição ocorreu entre 10% e 20% de escorregamento, conforme ilustrado na Figura 2.28. Como todos os ensaios no regime tipo III aconteceram sob uma mesma carga, não foi

possível verificar a contribuição isolada da força tangencial e da área de contato nominal para a variação das taxas de desgaste nestas condições.

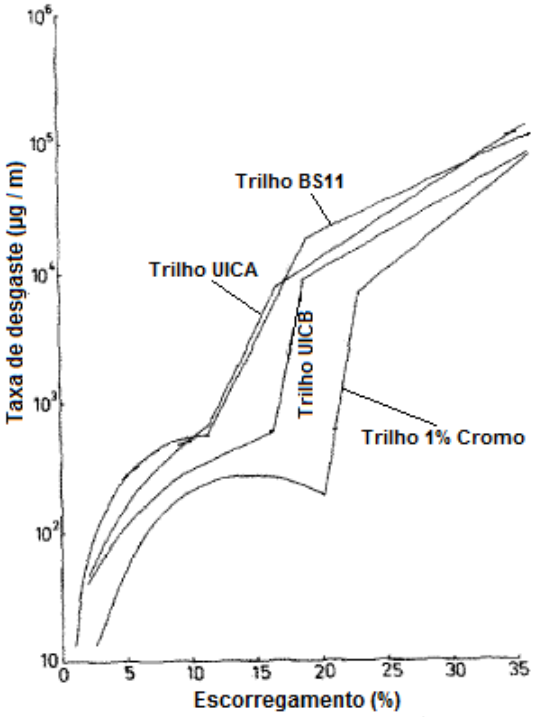


Figura 2.28 – Variação das taxas de desgaste dos discos de diferentes tipos de trilho em relação ao escorregamento (γ), em ensaios sob o carregamento de 200 kgf. Fonte: adaptado de (BOLTON e CLAYTON, 1984).

2.7.2. Ensaios *twin disc*

Outros pesquisadores também utilizaram ensaios na configuração *twin disc* para estudar o desgaste em pares de materiais de roda e trilho. Danks e Clayton (1987) utilizaram a mesma máquina da pesquisa de Bolton e Clayton (1984), variando o escorregamento e a pressão nominal de contato respectivamente entre 1 – 35% e 500 – 1280 MPa. Já Perez-Unzueta e Beynon (1993) trabalharam com duas condições de ensaio: pressão nominal de contato de 1300 MPa combinada com escorregamento de 3% e pressão nominal de contato de 500 MPa combinada com escorregamento de 10%.

Danks e Clayton (1987) também observaram 3 regimes de desgaste em sua pesquisa, todos eles variando o coeficiente de atrito entre 0,60 e 0,67. As superfícies desgastadas no regime III, pelo aspecto visual, foram as que mais se aproximaram do trilho testado na FAST (*Facility for Accelerated Service Testing*) sob condições de via não lubrificada, na região do canto de bitola. A Figura 2.29

mostra que as superfícies dos discos ficaram muito rugosas e com muitos sulcos (*gouge marks*), com comprimentos maiores do que 1 mm e com material deslocado para suas bordas (*high spots*). A camada deformada nos discos, para este regime, não ficou uniforme. Pôde-se perceber regiões de alta e baixa deformação, através de análise da seção transversal. As lamelas de perlita foram direcionadas de forma paralela à superfície. Verificou-se também a presença de trincas superficiais, que não chegaram a atravessar a camada deformada:

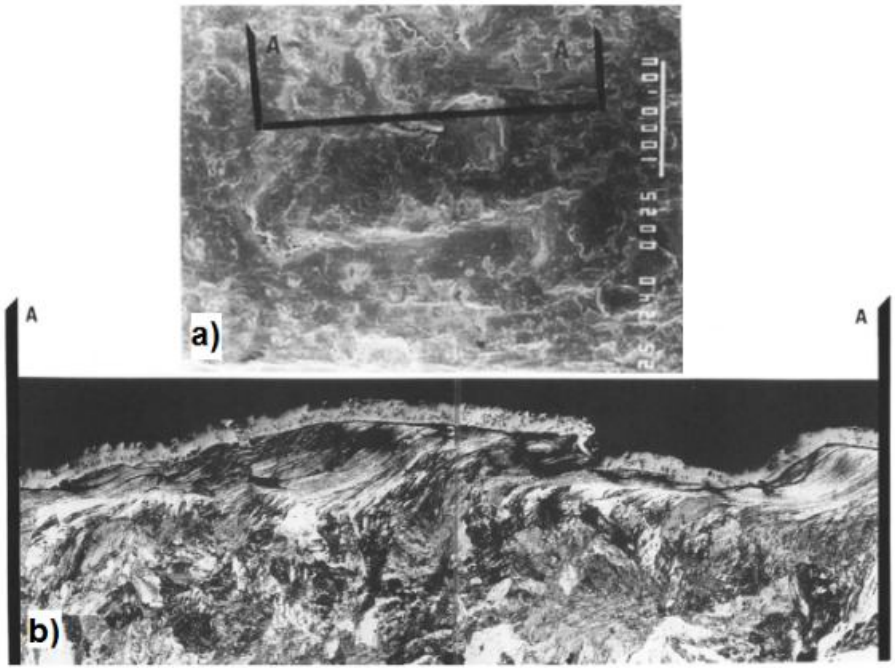


Figura 2.29 – (a) Micrografia de superfície desgastada no regime tipo III – ensaio *twin disc*; (b) Seção transversal do disco. Fonte: adaptado de (DANKS e CLAYTON, 1987).

Danks e Clayton avaliaram o desgaste também de trilhos em operação. Na sua superfície, região do canto de bitola, também foram observados sulcos compridos (acima de 5 mm) e profundos (em torno de 65 µm), além dos *high spots*. Assim como nos discos do regime III, os trilhos apresentaram algumas regiões com alta deformação subsuperficial e outras com muito pouca ou nenhuma deformação. Trincas superficiais também foram observadas, mais frequentes e maiores do que nos ensaios em laboratório, conforme exposto na Figura 2.30.

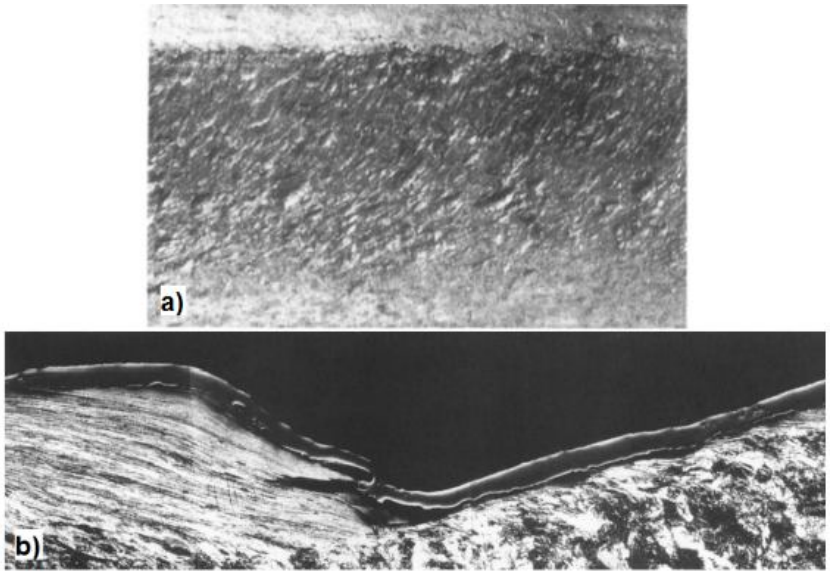


Figura 2.30 – (a) Superfície do trilho, no canto de bitola; (b) Seção transversal do trilho. Fonte: adaptado de (DANKS e CLAYTON, 1987).

As taxas de desgaste no tipo III ficaram de uma a duas ordens de grandeza superiores do que as encontradas nos regimes I e II e sofreram grande influência do nível de deslizamento (DANKS e CLAYTON, 1987), como mostra o gráfico da Figura 2.31.

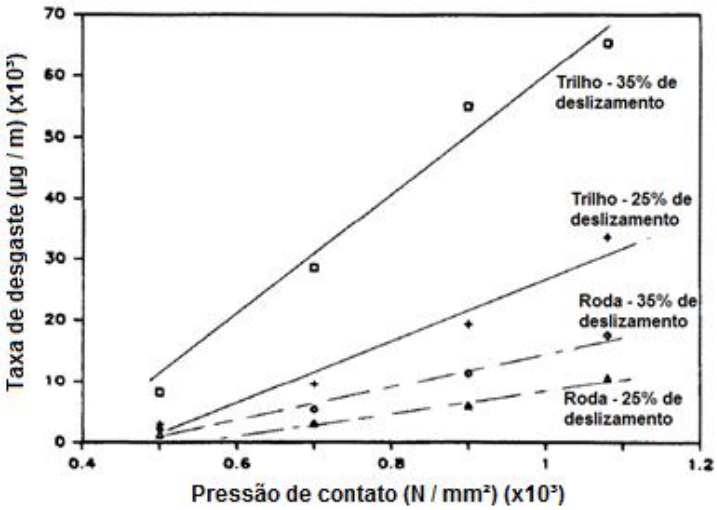


Figura 2.31 – Gráficos da taxa de desgaste vs. pressão de contato no regime tipo III. Fonte: adaptado de (DANKS e CLAYTON, 1987).

Todos os ensaios de rolamento-deslizamento de Perez-Unzueta e Beynon (1993) geraram um regime de desgaste moderado, relacionado ao tipo I da pesquisa de Bolton e Clayton (1984). *Debris* oxidados e finos foram observados. Eles avaliaram a influência do espaçamento interlamelar da perlita no desgaste e concluíram que, quanto menor o espaçamento interlamelar, maior a dureza e

menor o desgaste do trilho. A diminuição das taxas de desgaste com o aumento da dureza seguiu uma relação linear, como pode ser visto na Figura 2.32.

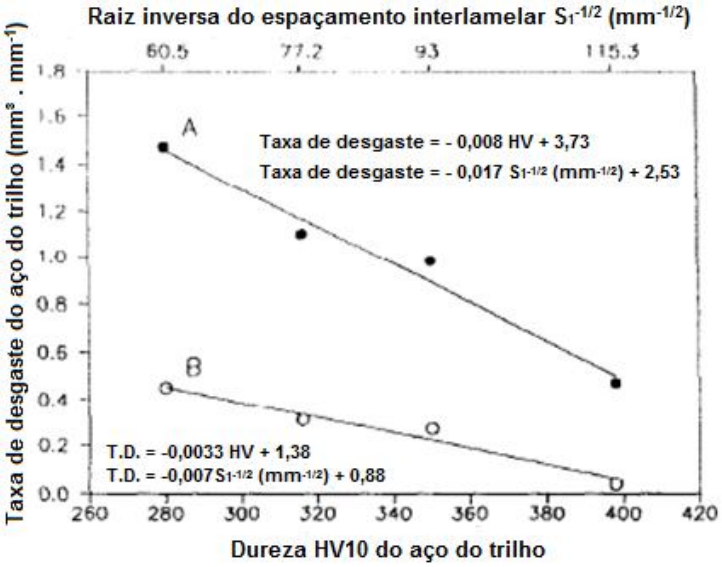


Figura 2.32 – Taxa de desgaste de aços de trilhos vs. dureza e espaçamento interlamelar. Linha A: P_0 = 1300 MPa e γ = 3%. Linha B: P_0 = 500 MPa e γ = 10%. Fonte: adaptado de (PEREZ-UNZUETA e BEYNON, 1993).

2.7.3. Ensaios pino-disco

Danks e Clayton (1987) trabalharam também na configuração pino-disco. Utilizaram pinos com 6 mm de diâmetro usinados a partir de trilhos novos de aço carbono comum e discos usinados a partir de rodas novas de composição química similar. Variaram a carga entre 30 N e 2700 N e mantiveram a velocidade de deslizamento constante em 0,165 m/s. Mediram o desgaste do pino através de pesagens periódicas e calcularam a taxa de desgaste pela relação da perda de massa por distância deslizada. Foram propostas 3 interpretações diferentes para os resultados dos ensaios. A alternativa mais provável é de que foram obtidos dois regimes de desgaste, sendo o primeiro com taxa de desgaste relativamente linear até uma carga de 1570 N, a partir da qual se observa um segundo regime com crescimento repentino das taxas de desgaste, conforme exibido na Figura 2.33.

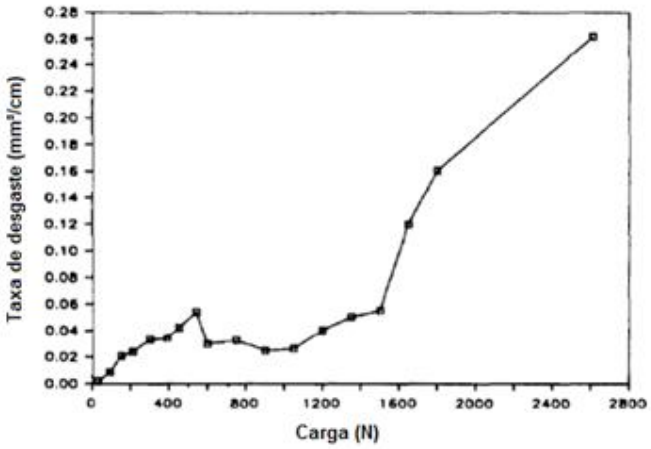


Figura 2.33 – Taxas de desgaste do ensaio pino-disco, em relação ao carregamento. Fonte: adaptado de (DANKS e CLAYTON, 1987).

As análises das superfícies desgastadas dos pinos dos ensaios de Danks e Clayton (1987), apresentadas na Figura 2.34, não revelaram alterações significativas que pudessem indicar ocorrência de diferentes mecanismos de desgaste. Na visão dos autores, o que se observou nos pinos ensaiados nas maiores cargas foi o mesmo que se viu nas menores cargas, porém de forma mais acentuada. A única diferença visível foi que, para menores cargas, os sulcos atravessaram toda superfície desgastada, enquanto que nos maiores carregamentos os sulcos ficaram mais largos e menores, muitas vezes não chegando a atravessar toda superfície e terminando em amontoados de material de mesma largura e altura que o próprio sulco, o que sugeriu a presença de partículas abrasivas de terceiro corpo.

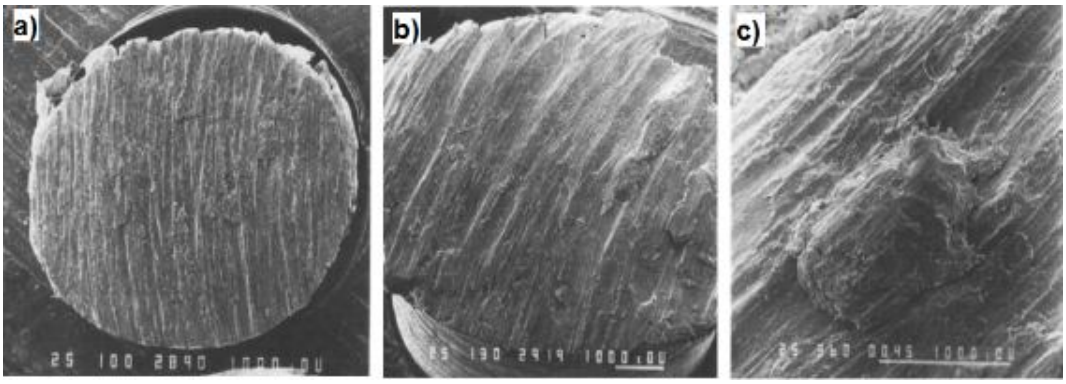


Figura 2.34 – Superfícies desgastadas dos pinos com (a) 30 N de carga e (b) 1670 N de carga; (c) *Debris* acumulado na trilha de desgaste. Fonte: adaptado de (DANKS e CLAYTON, 1987).

Perez Unzueta e Beynon (1993) utilizaram pinos usinados a partir dos boletos de quatro diferentes tipos de trilhos e discos usinados de um mesmo tipo de roda,

todos de aços perlíticos. A ponta dos pinos foi arredondada, de modo que houvesse um contato hertziano válido para o contato inicial entre a extremidade esférica do pino e o disco. Com o desgaste do pino, uma superfície conforme de contato foi formada. A velocidade dos ensaios foi mantida constante em 0,1 m/s. Os ensaios foram parados em diferentes intervalos e a área de desgaste dos pinos foi medida com auxílio de Microscópio Óptico. A retomada era sempre feita com a carga aumentada, de modo a manter a pressão de contato em 20 MPa.

Assim como nos ensaios de rolamento-deslizamento, os ensaios em deslizamento puro também mostraram uma queda relativamente linear na taxa de desgaste com o aumento da dureza do pino (PEREZ-UNZUETA e BEYNON, 1993), conforme apresentado na Figura 2.35.

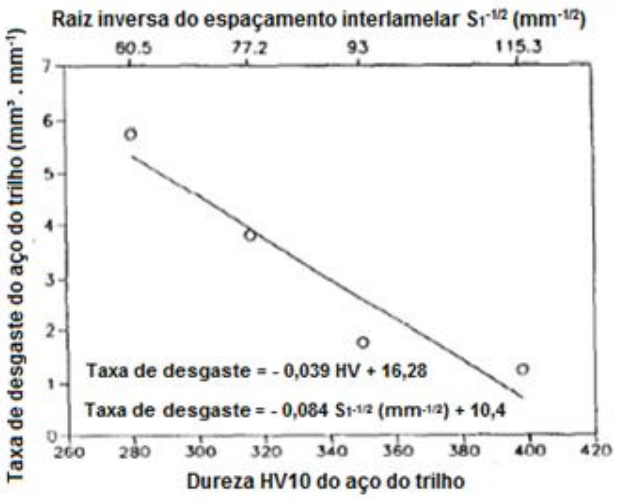


Figura 2.35 – Taxa de desgaste de aços de trilhos vs. dureza e espaçamento interlamelar. Ensaios de deslizamento puro. Fonte: adaptado de (PEREZ-UNZUETA e BEYNON, 1993).

Após os ensaios, as superfícies de contato apresentaram deformação plástica. A Figura 2.36 mostra que as lamelas de perlita foram dobradas, quebradas e alinhadas paralelamente à direção de deslizamento. Para profundidades acima de 35 µm, observou-se a microestrutura original dos aços. Ao se aproximar da superfície, foi possível identificar as lamelas sendo dobradas e o espaçamento interlamelar sendo reduzido até que, em profundidades de até 5 µm, a ferrita lamelar foi severamente deformada e a cementita lamelar severamente compactada, não sendo possível distinguir lamelas individuais.

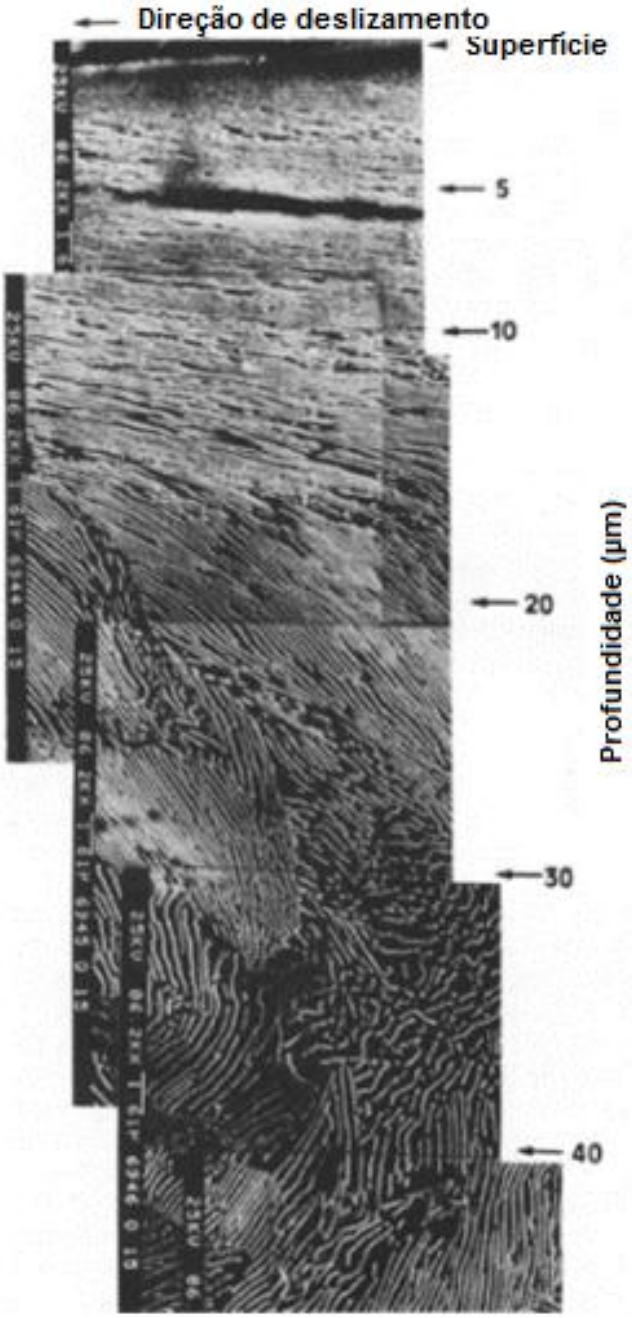


Figura 2.36 – Imagem do aço do trilho após ensaio de deslizamento puro à pressão nominal máxima de 20 MPa, retirada do MEV. Fonte: adaptado de (PEREZ-UNZUETA e BEYNON, 1993).

Deformação plástica similar na superfície de pinos de aço 1080 – similar ao aço da roda classe C da norma AAR – foi observada por Chaves (2017), após realização de ensaios pino-disco com carga de 10 N e velocidade de deslizamento de 0,5 m/s, contra discos de aço ABNT H13 temperados e com dureza superficial mínima de 600 HV. A Figura 2.37 apresenta as imagens da

seção transversal de pinos fabricados a partir de diferentes temperaturas de tratamento isotérmico, com deformação severa da perlita em regiões subsuperficiais.

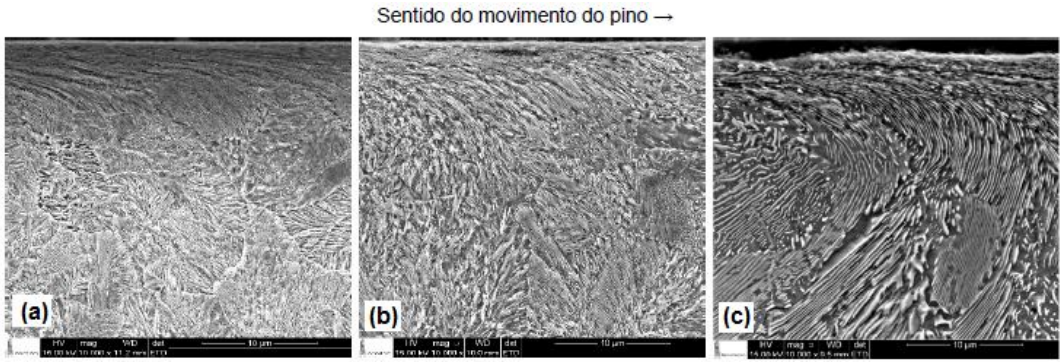


Figura 2.37 – Aspecto da superfície transversal de pinos perlíticos tratados em patamares isotérmicos de (a) 550 °C; (b) 625 °C e (c) 700 °C, após ensaios de desgaste na configuração pino-disco. Fonte: adaptado de (CHAVES, 2017).

U. P. Singh e Ramakant Singh (1993) também trabalharam com aços de rodas e trilhos e correlacionaram as taxas de desgaste com o espaçamento interlamelar da perlita. Trabalharam com pinos de 8 mm de diâmetro fabricados com aços de trilhos e discos de 100 mm de diâmetro fabricados com aços de rodas. Assim como Perez Unzueta e Beynon (1993), verificaram uma queda na taxa de desgaste com o aumento da dureza dos pinos, ligada por sua vez a um menor espaçamento interlamelar da perlita. Analisando os gráficos da Figura 2.38, percebe-se que a variação do desgaste do pino em função da carga normal foi menor nos ensaios contra o disco de roda fundida – dureza de 324 HB – do que contra o disco de roda forjada – 227 HB. O desgaste do pino fabricado com material de trilho RS-1 foi consideravelmente maior nos ensaios contra os discos mais duros, principalmente nas menores cargas. Já os pinos fabricados com os materiais RS-2 e RS-3 tiveram menor desgaste quando ensaiados contra os discos mais duros, especialmente para cargas maiores. A Tabela 2.4 apresenta os valores de espaçamento interlamelar e dureza dos aços.

Tabela 2.4 – Espaçamento interlamelar médio da perlita e dureza dos aços dos trilhos.

Aço	RS-1	RS-2	RS-3
Espaçamento interlamelar (µm), *S*	**0,45**	**0,20**	**0,08**
Raiz inversa do espaçamento interlamelar ($\mu m^{-1/2}$), $S^{-1/2}$	**1,49**	**2,24**	**3,54**
Dureza Brinell (HB)	**235**	**278**	**322**

Fonte: adaptado de (SINGH, U. P. e SINGH, R.; 1993).

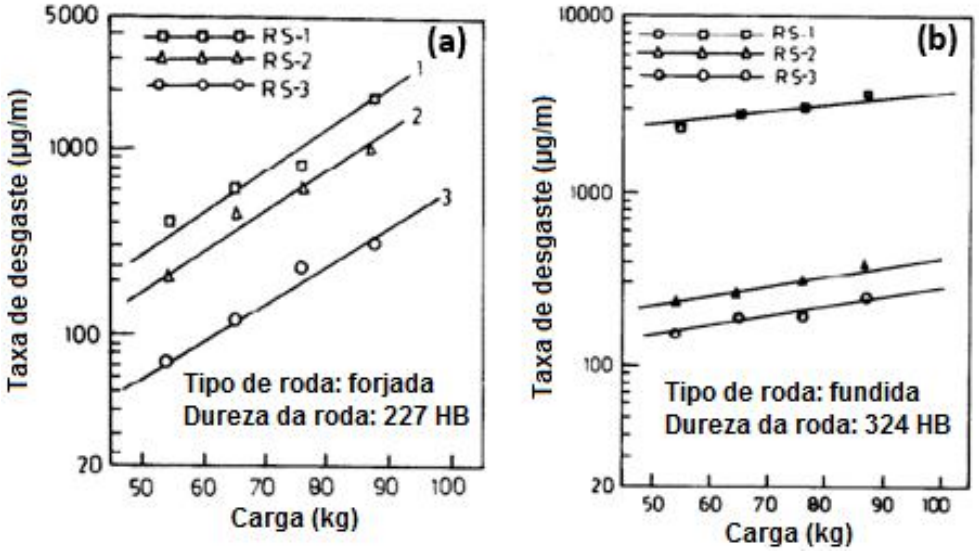


Figura 2.38 – Gráficos da taxa de desgaste vs. carga aplicada para os pinos dos 03 tipos de trilhos contra (a) discos de roda forjada de dureza 227 HB e (b) discos de roda fundida de dureza 324 HB. Fonte: adaptado de (SINGH, U. P.; SINGH, R. 1993).

Chaves (2017) também observou uma relação proporcional entre o desgaste de pinos perlíticos e o espaçamento interlamelar da perlita – logo, inversamente proporcional à dureza. Os resultados são apresentados na Tabela 2.5 e na Figura 2.39.

Tabela 2.5 – Características dos pinos utilizados nos ensaios pino-disco.

Temperatura de tratamento isotérmico [°C]	Espaçamento interlamelar da perlita [nm]	Dureza VIckers [HV]
550	70	381
625	128	320
700	243	224

Fonte: adaptado de (CHAVES, 2017).

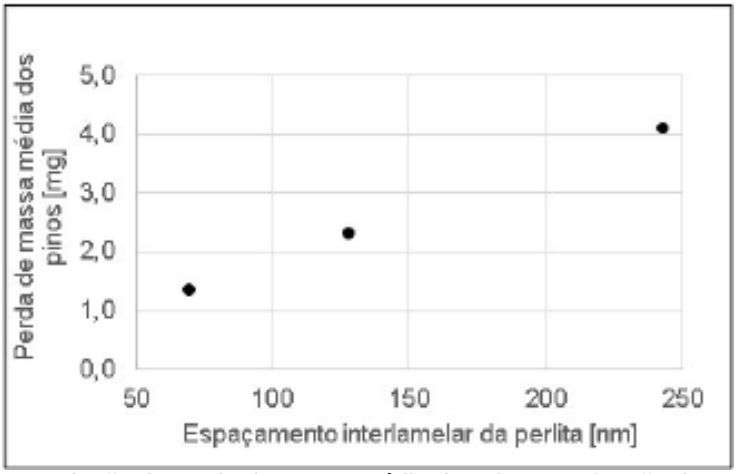


Figura 2.39 – Variação da perda de massa média dos pinos em função do espaçamento interlamelar da perlita. Fonte: (CHAVES, 2017).

Olofsson e Telliskivi (2003) estudaram o desgaste de trilhos de uma ferrovia sueca próxima à Estocolmo. Escolheram 4 trechos para monitoramento, onde as principais variáveis foram o tipo de trilho e a lubrificação em curvas:

- Trilho UIC 900A (0,7%C + 1% Mn e limite de resistência à tração = 880 MPa. A dureza média do boleto, medida pela técnica de rebote, foi de 255 HV) ou UIC 1100 (0,7%C + 1% Mn + 1% Cr e limite de resistência à tração = 1080 MPa. A dureza média do boleto, medida pela técnica de rebote, foi de 315 HV);
- Curvas com e sem lubrificação: curva 1 com lubrificação no canto de bitola do trilho externo e curva 2 sem lubrificação. Os raios das curvas eram próximos: 346 e 303 metros, respectivamente.

Definiram 3 pontos para medição do desgaste nos trilhos, indicados na Figura 2.40: W1 – região do topo do boleto – W2 e W3 – região do canto de bitola. Segundo os autores, a utilização de um trilho com melhores propriedades mecânicas foi menos efetiva na redução do desgaste do que a diminuição da velocidade de deslizamento – a velocidade de deslizamento seria maior em W2 e W3 do que em W1. Para condições de contato similares, o desgaste do trilho UIC 1100 foi em torno de 3 vezes menor que do trilho UIC 900A. Para o mesmo material, em curvas não lubrificadas, o desgaste do canto de bitola foi aproximadamente 10 vezes maior que no topo do boleto.

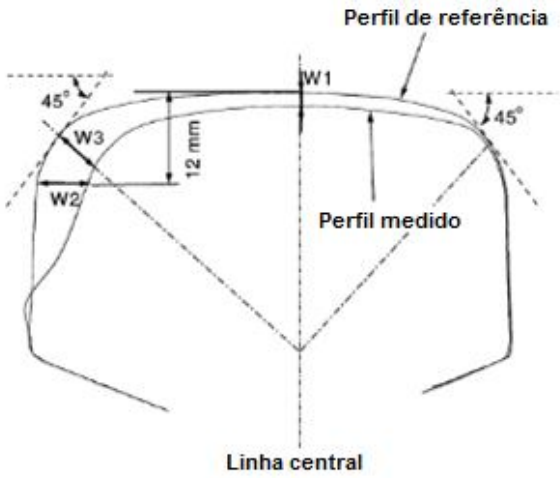


Figura 2.40 – Variáveis para quantificação do desgaste. Fonte: adaptado de (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).

Importante salientar que no canto de bitola (W2 e W3) a distância de deslizamento para um determinado período de tempo e as pressões de contato são maiores do que no topo do boleto (W1). Na visão deste autor, estes fatores, somados à maior velocidade de deslizamento, são os motivos para o maior volume desgastado na região do canto de bitola.

Jendel (2000, *apud* Olofsson e Telliskivi, 2003) e Knothe, Theiler e Güney (1999, *apud* Olofsson e Telliskivi, 2003) haviam verificado, através de simulações computacionais para a ferrovia sueca, que, em curvas com raio de aproximadamente 300 metros, a primeira roda do truque dianteiro entra em contato com canto de bitola do trilho externo e segunda roda fica em contato com topo do boleto do trilho externo. O contato entre o topo do boleto do trilho e o passeio da roda é tipicamente de rolamento com um certo nível de deslizamento, sendo bem representado pela configuração *twin disc*. Nas simulações, a velocidade de deslizamento máxima encontrada foi de 0,1 m/s, enquanto a maior pressão de contato foi de aproximadamente 1,5 GPa. Já o contato entre o canto de bitola do trilho com o friso da roda é de deslizamento puro, especialmente em curvas de raio pequeno. A configuração pino-disco representa bem este caso, que chega a ter velocidades de deslizamento e pressões de contato máximas de 0,9 m/s e 2,7 GPa, respectivamente. Olofsson e Telliskivi (2003) utilizaram os resultados destas simulações para definir os parâmetros de seus ensaios, tanto para configuração *twin disc* quanto para pino-disco, como pode ser visto no gráfico da Figura 2.41.

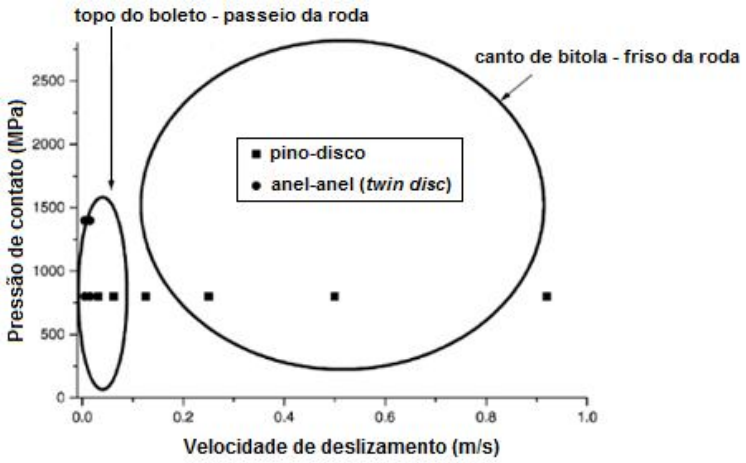


Figura 2.41 – Dados dos ensaios sobrepostos ao resultado da simulação na curva 2, com 303 m de raio e sem lubrificação. Fonte: adaptado de (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).

Para obter as altas pressões de contato indicadas nas simulações, Olofsson e Telliskivi (2003) trabalharam com a teoria de Hertz. Nos ensaios pino-disco, o pino utilizado tinha a ponta esférica, com 5 mm de raio, e era feito com material do trilho. O disco rotativo foi confeccionado com material da roda. Foi possível estudar o comportamento da taxa de desgaste para os dois aços do trilho, variando a velocidade relativa. Já nos ensaios *twin disc*, os dois discos tinham a mesma rotação. A relação entre os diferentes diâmetros dos discos permitiu variar o escorregamento entre 0,5 e 1,5%. Os discos das rodas foram produzidos com a superfície coroada e os dos trilhos com a superfície plana. A Figura 2.42 apresenta as diferentes configurações dos ensaios.

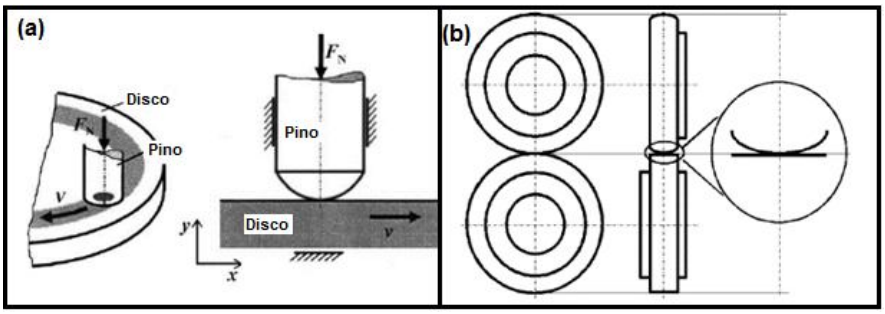


Figura 2.42 – Desenhos esquemáticos dos ensaios nas configurações (a) pino-disco e (b) *twin* disc. Fonte: adaptado de (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).

Para ambos os ensaios, a influência da velocidade de deslizamento no desgaste foi muito maior do que influência da pressão de contato, como pode ser visto pela variação do coeficiente de desgaste adimensional no gráfico da Figura 2.43, confirmando o que foi observado nos testes em campo: maior desgaste no canto de bitola – região com deslizamento puro.

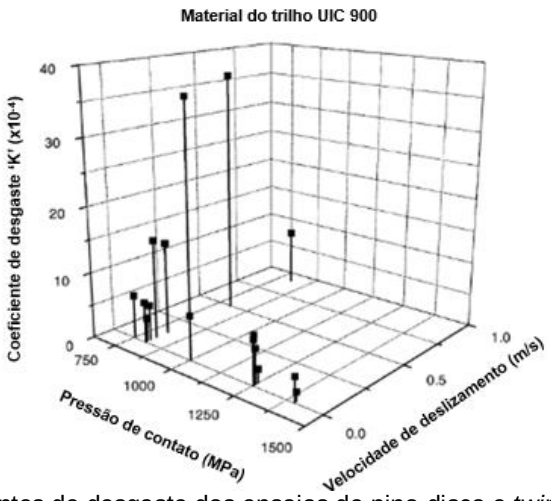


Figura 2.43 – Coeficientes de desgaste dos ensaios de pino-disco e *twin disc*. Fonte: adaptado de (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).

Nos ensaios pino-disco, realizados à pressão de contato nominal de 800 MPa, percebe-se um aumento na severidade do desgaste com o aumento da velocidade de deslizamento até chegar a 0,9 m/s, condição na qual o coeficiente de desgaste diminui, assim como o coeficiente de atrito médio (μ) – resultados apresentados na Tabela 2.6 (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003). Na visão deste autor, provavelmente em altas velocidades o aumento de temperatura favoreceu à ocorrência de oxidação nas superfícies de contato, havendo assim uma queda no coeficiente de atrito e um regime de desgaste moderado.

Tabela 2.6 – Resultados de coeficiente de desgaste e coeficiente de atrito médio para as diferentes condições de contato do ensaio pino-disco.

Material	Velocidade (m/s)	K ($x10^{-4}$)	μ médio
UIC 900	**0,9**	**8,6**	**0,20**
UIC 900	**0,5**	**37**	**0,59**
UIC 900	**0,25**	**35**	**0,56**
UIC 900	**0,125**	**14**	**0,43**
UIC 900	**0,0625**	**15**	**0,53**
UIC 900	**0,03125**	**5,3**	**0,50**
UIC 1100	**0,9**	**1,9**	**0,35**
UIC 1100	**0,5**	**37**	**0,46**
UIC 1100	**0,25**	**31**	**0,55**
UIC 1100	**0,125**	**12**	**0,56**
UIC 1100	**0,0625**	**6,9**	**0,54**
UIC 1100	**0,03125**	**19**	**0,50**

Fonte: adaptado de (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).

Nas duas configurações de ensaio, a mudança de material foi pouco significante quanto ao desgaste. A mesma tendência de menor influência do material foi observada nos testes em campo (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).

Viáfara *et al* (2005) estudaram as relações entre microestrutura e comportamento ao desgaste de aços perlíticos e bainíticos (pinos) deslizando sobre aços perlíticos (discos), em diferentes condições de carregamento. Para isso utilizaram aços listados na Tabela 2.7, similares aos utilizados em trilhos e rodas:

Tabela 2.7 – Microestrutura e a dureza medida para os aços estudados.

Aço	Microestrutura	Dureza [HV_{30}]
15B30 (pinos)	**Bainita inferior**	**400-420**
1070 (pinos)	**Perlita fina**	**320-340**
1085 (discos)	**Perlita fina**	**325-345**

Fonte: adaptado de (VIÁFARA *et al*, 2005).

Trabalharam com 3 diferentes carregamentos (10N, 30N e 50N) e velocidade de deslizamento constante em 1 m/s. Como mostra a Figura 2.44, a taxa de desgaste para pinos bainíticos cresceu continuamente com o aumento de carga, o que pode ser justificado pela sua baixa capacidade de encruamento. Os valores medidos foram pelo menos duas ordens de grandeza maiores que no caso dos pinos perlíticos.

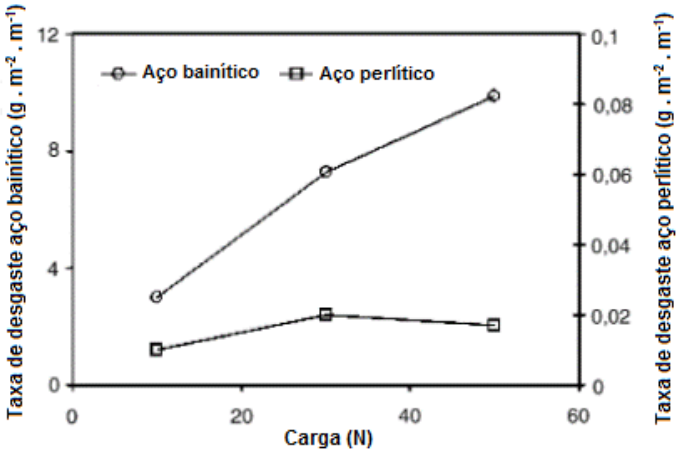


Figura 2.44 – Taxa de desgaste em função da carga normal, para pinos perlíticos e bainíticos. Fonte: adaptado de (VIÁFARA *et al*, 2005).

O menor desgaste dos pinos perlíticos em relação aos bainíticos pode ser explicado pela sua melhor capacidade de encruamento, atribuída ao formato e distribuição dos carbonetos, representada pelo espaçamento interlamelar. A

Figura 2.45 apresenta o perfil de microdureza dos pinos perlíticos de acordo com a carga aplicada. Para os pinos bainíticos, não foi observado encruamento após as medições de microdureza. O trabalho do atrito nestes últimos é gasto em deformação plástica e cisalhamento do material. A baixa tenacidade do material facilita a propagação de trincas (VIÁFARA *et al*, 2005).

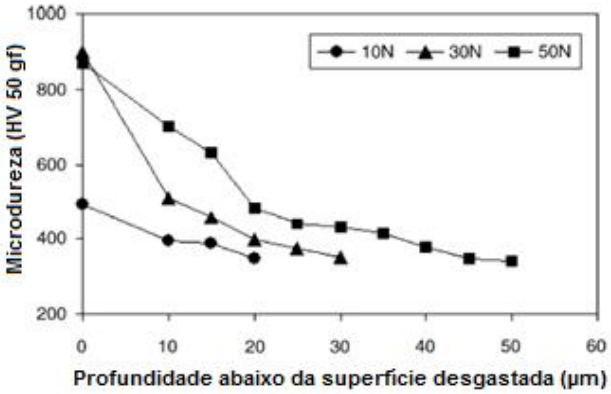


Figura 2.45 – Variação da microdureza em função da profundidade a partir da superfície desgastada em pinos perlíticos de aço AISI 1070. Fonte: adaptado de (VIÁFARA *et al*, 2005).

Não houve mudanças significativas no coeficiente de atrito em função da variação da carga normal, como pode ser visto na Figura 2.46, embora as perdas de massa tenham sido muito diferentes em cada caso (VIÁFARA *et al*, 2005).

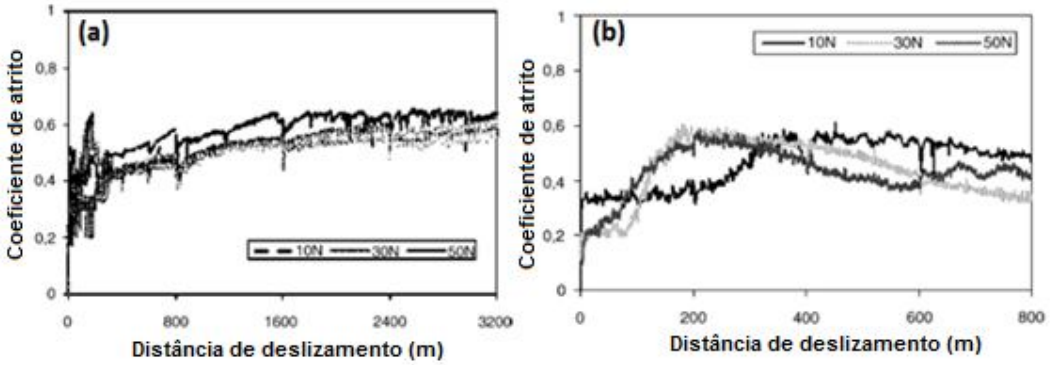
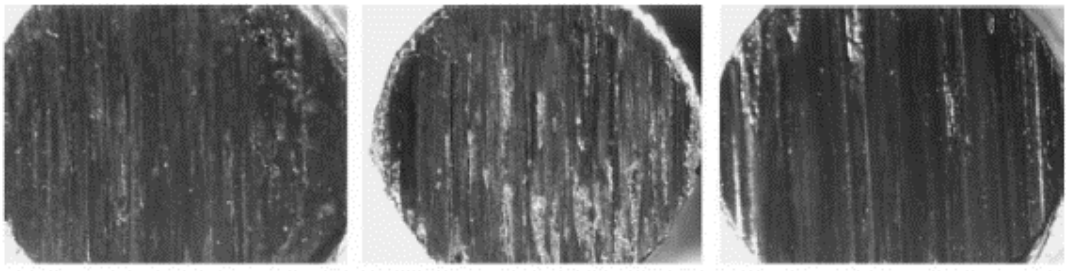


Figura 2.46 – Variação do coeficiente de atrito em função da distância deslizada e da carga normal, para (a) pinos perlíticos e (b) bainíticos. Fonte: adaptado de (VIÁFARA *et al*, 2005).

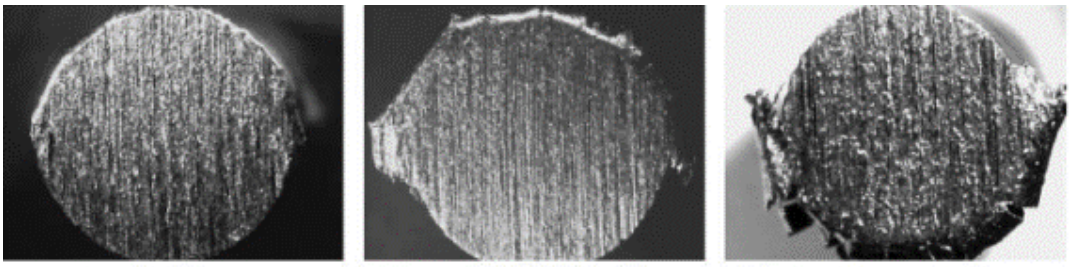
Viáfara *et al* (2005) também avaliaram as superfícies desgastadas dos pinos para diferentes cargas (Figuras 2.47 e 2.48). Nos pinos perlíticos foi detectada a presença de óxidos, que ajudam a prevenir o contato metálico entre as superfícies, levando a um regime de desgaste oxidativo moderado. Nos pinos bainíticos, a adesão foi o mecanismo de desgaste mais importante, em conjunto

com intensa deformação plástica, que se tornou mais evidente para os ensaios com as maiores cargas.



(a) 10 N (b) 30N (c) 50 N

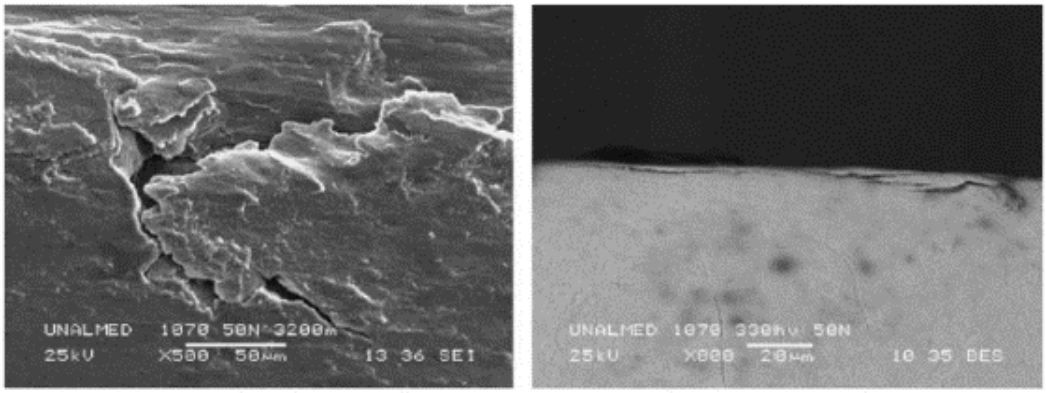
Figura 2.47 – Superfícies desgastadas do pino de aço AISI 1070, para diferentes cargas. Fonte: (VIÁFARA *et al*, 2005).



(a) 10 N (b) 30N (c) 50 N

Figura 2.48 – Superfícies desgastadas do pino de aço AISI 15B30, para diferentes cargas. Fonte: (VIÁFARA *et al*, 2005).

Os mecanismos de danos preponderantes nos pinos perlíticos, apresentados nas Figuras 2.49 e 2.50, foram: formação de juntas de adesão e propagação de trincas subsuperficiais, em um processo de delaminação similar ao relatado por Zum Gahr (1987).



(a) 30 N (b) 50 N

Figura 2.49 – (a) Juntas de adesão e (b) trincas subsuperficiais observadas na superfície desgastada de pino de aço AISI 1070. Fonte: (VIÁFARA *et al*, 2005).

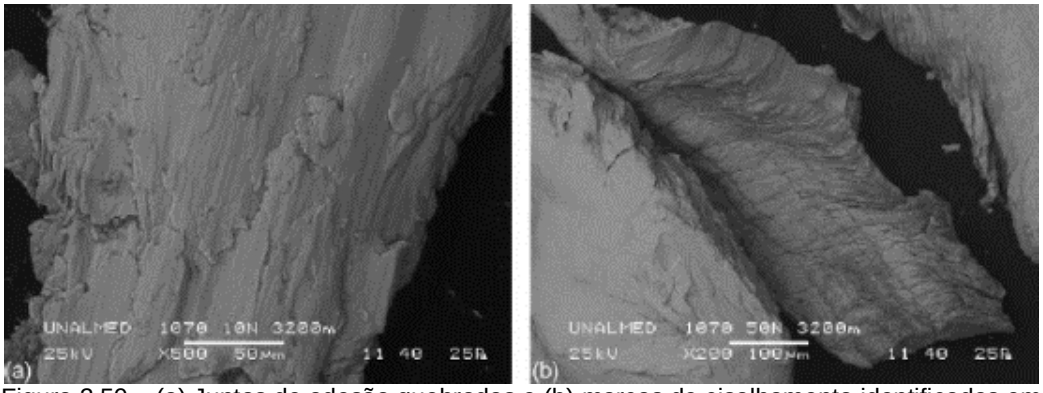


Figura 2.50 – (a) Juntas de adesão quebradas e (b) marcas de cisalhamento identificadas em *debris* de pinos de aço AISI 1070 - análise no MEV. Fonte: (VIÁFARA *et al*, 2005).

As juntas de adesão também foram observadas, ainda mais frequentes, nos pinos bainíticos, como pode ser visto na Figura 2.51, o que justifica as maiores taxas de desgaste encontradas neste material (VIÁFARA *et al*, 2005).

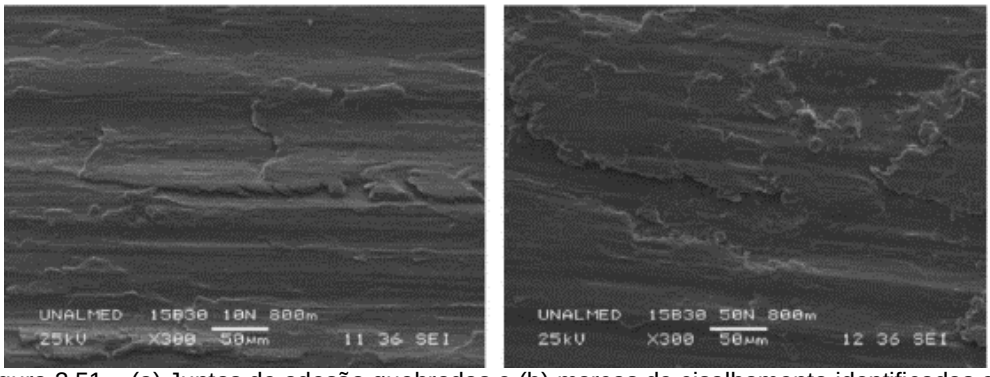


Figura 2.51 – (a) Juntas de adesão quebradas e (b) marcas de cisalhamento identificados em *debris* de pinos de aço AISI 15B30 - análise no MEV. Fonte: (VIÁFARA *et al*, 2005).

Zhu *et al* (2015) apresentaram trabalho experimental que estudou a influência das condições ambientais e óxidos de ferro no coeficiente de atrito entre as rodas e trilhos. Discos foram pré-tratados em câmaras com ambiente controlado, para geração de óxidos. Metade dos discos sofreu pré-tratamento. Nenhum pino foi previamente tratado.

Nesta pesquisa, pressão de contato e velocidade de deslizamento foram mantidas constantes em 900 MPa e 0,01 m/s, respectivamente. As variáveis dos ensaios, além do uso ou não de discos pré-tratados, foram: temperatura - 3 °C, 10 °C e 20 °C – e umidade relativa (UR) – 40%, 55%, 70% e 85%. Conforme exibido na Figura 2.52, verificou-se que geralmente os valores do coeficiente de atrito (μ) decrescem com o aumento da umidade relativa até um valor de saturação (μ de aproximadamente 0,4). A partir deste valor, o coeficiente de atrito

se mantém praticamente estável com o aumento da umidade relativa. A temperatura também impacta na redução do coeficiente de atrito. Para baixa temperatura, um pequeno incremento na umidade diminui drasticamente o coeficiente de atrito. Isso pode explicar porque os problemas de baixa adesão no contato roda-trilho, em ferrovias suecas, tornam-se mais severos no inverno (ZHU *et al*, 2015).

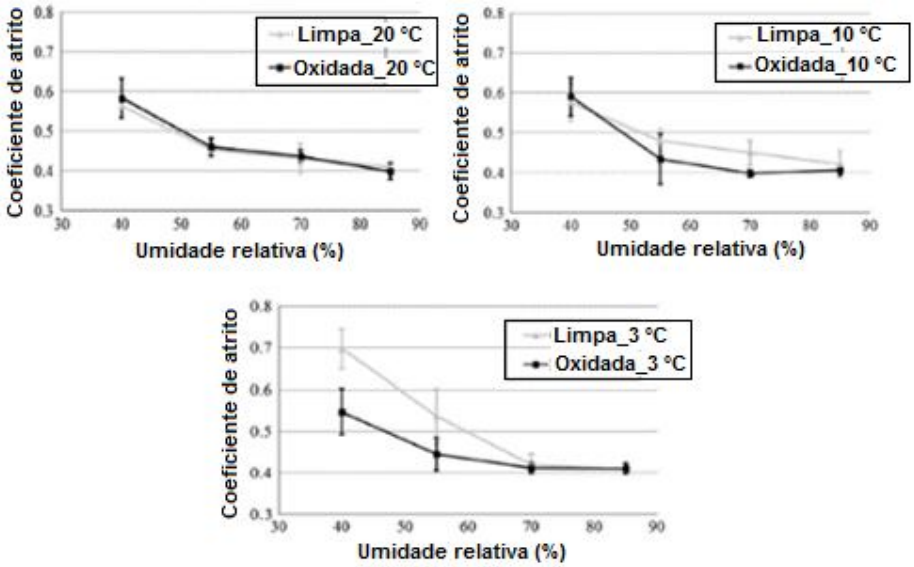


Figura 2.52 – Gráficos do coeficiente de atrito μ vs. umidade relativa, para amostras limpas e oxidadas, em diferentes temperaturas de ensaio. Fonte: adaptado de (ZHU *et al*, 2015).

Outra influência importante da umidade relativa foi nos modos de desgaste das superfícies em contato, apresentados na Figura 2.53. Maior oxidação da superfície foi observada nas amostras mais úmidas, enquanto que apenas alguns pontos de oxidação foram encontrados na amostra seca. Isso foi observado inclusive nas amostras que não sofreram oxidação prévia, logo as partes oxidadas foram geradas durante os ensaios. Na condição úmida, a camada formada pelo vapor d'água atua como um filme que reduz consideravelmente a força de adesão entre os metais, prevenindo-os do contato direto metal-metal. Assim, regiões amplas da camada protetora de óxido permanecem na superfície. Na condição de umidade relativa baixa, o efeito do filme de vapor d'água pode ser desconsiderado e o contato é geralmente metal-metal, com as camadas de óxido sendo removidas rapidamente. Marcas de adesão foram observadas em todos os ensaios, mas em maior frequência nos ensaios com umidade relativa baixa (ZHU *et al*, 2015).

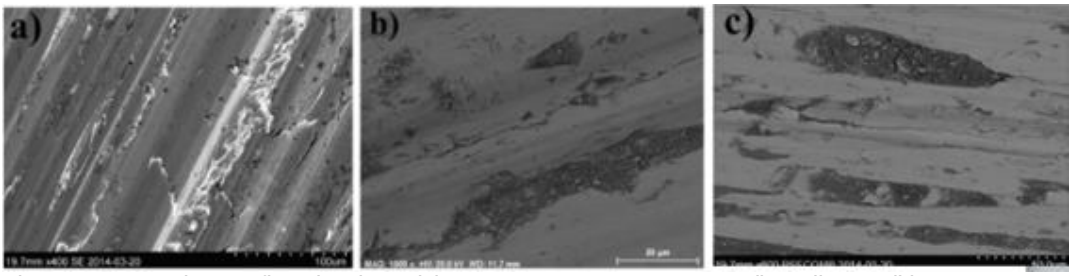


Figura 2.53 – Micrografias de pinos (a) 20 °C, UR = 40%, contra disco limpo; (b) 20 °C, UR = 85%, contra disco limpo; (c) 10 °C, UR = 85%, contra disco limpo. Fonte: adaptado de (ZHU *et al*, 2015).

2.7.4. Mapeamento dos regimes de desgaste

Lewis e Olofsson (2004) utilizaram dados experimentais de desgaste em trilhos disponíveis na literatura para produzir mapas de desgaste e relacioná-los com diferentes condições do contato roda-trilho.

Para explicar as contribuições individuais dos parâmetros velocidade de deslizamento e pressão de contato, Lewis e Olofsson (2004) calcularam os coeficientes de desgaste (K) a partir dos dados de desgaste do trilho, através da equação de Archard.

Os coeficientes de desgaste foram indicados em relação à pressão de contato e à velocidade de deslizamento. Para baixas velocidades de deslizamento, os valores de K foram similares para os ensaios em pino-disco e *twin disc*. Os resultados mostraram que o coeficiente de desgaste é muito mais dependente da velocidade de deslizamento (LEWIS e OLOFSSON, 2004) do que da pressão de contato. O mesmo havia sido observado em testes em escala real (OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).

Os mapas de desgaste foram apresentados considerando todos os dados disponíveis e também focando os regimes moderado e severo, onde a maioria dos dados se encaixa, para os diferentes estudos, conforme ilustrado nas Figuras 2.54, 2.55 e 2.56 (LEWIS e OLOFSSON, 2004):

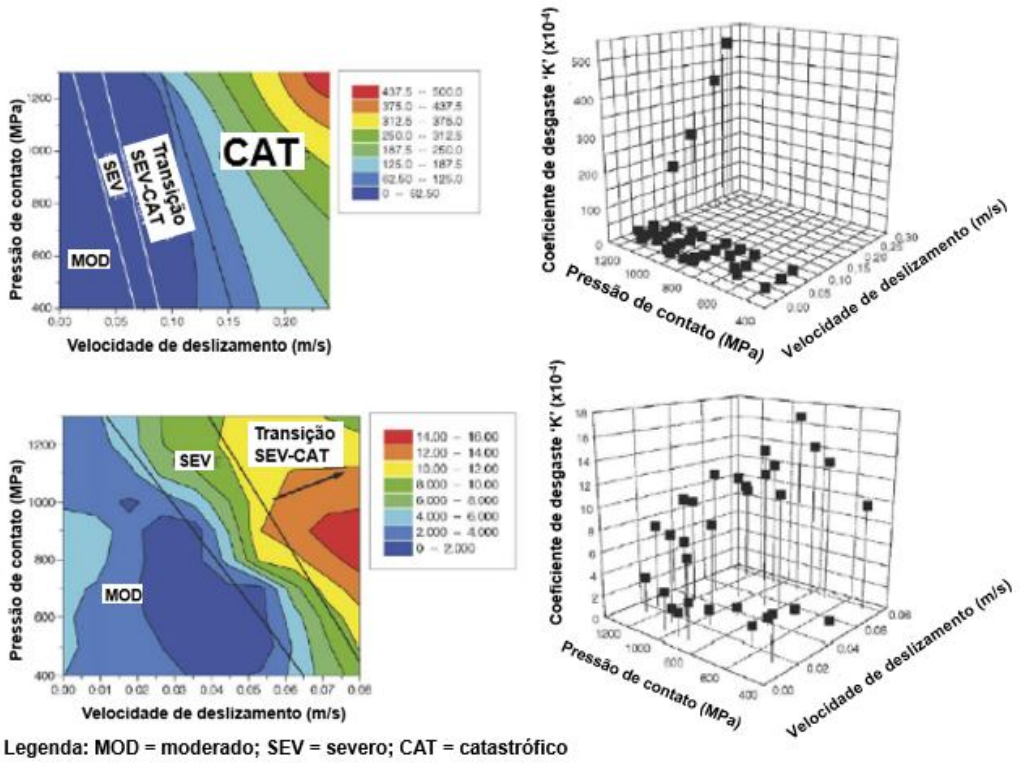


Figura 2.54 – Mapas de desgaste: trilho BS11 e roda perlítica. Ensaios *twin disc*. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2004. Dados de BOLTON e CLAYTON, 1984).

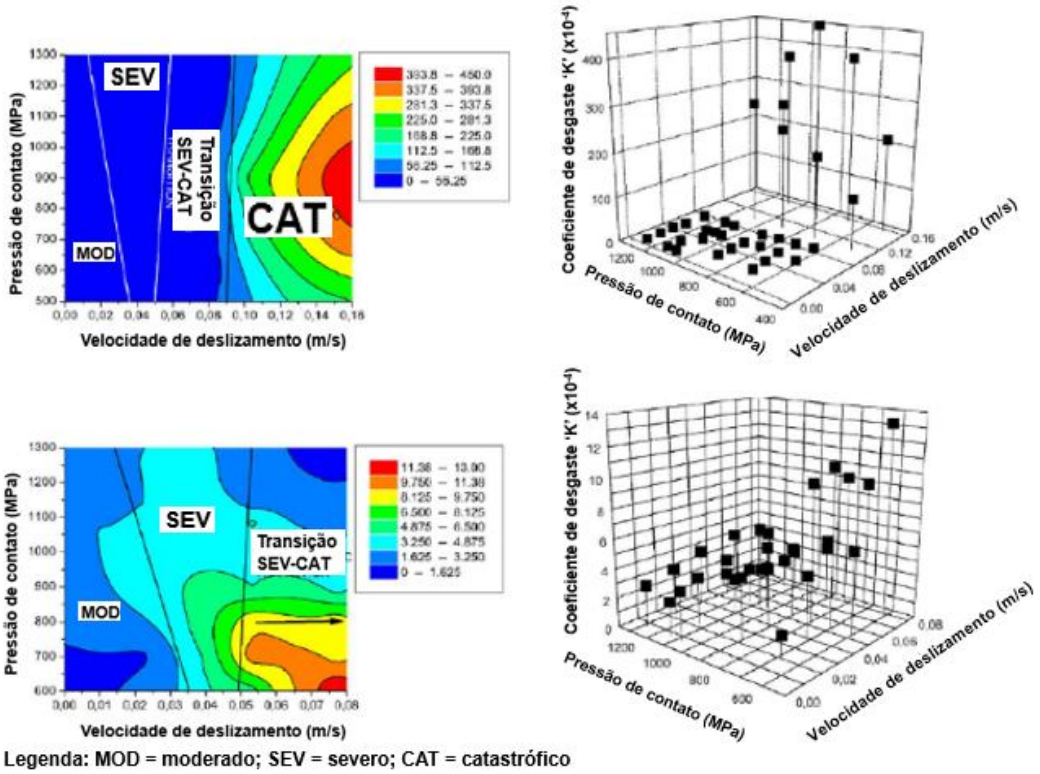


Figura 2.55 – Mapas de desgaste: trilho aço carbono e roda não especificada. Ensaios *twin disc*. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2004. Dados de DANKS e CLAYTON, 1987).

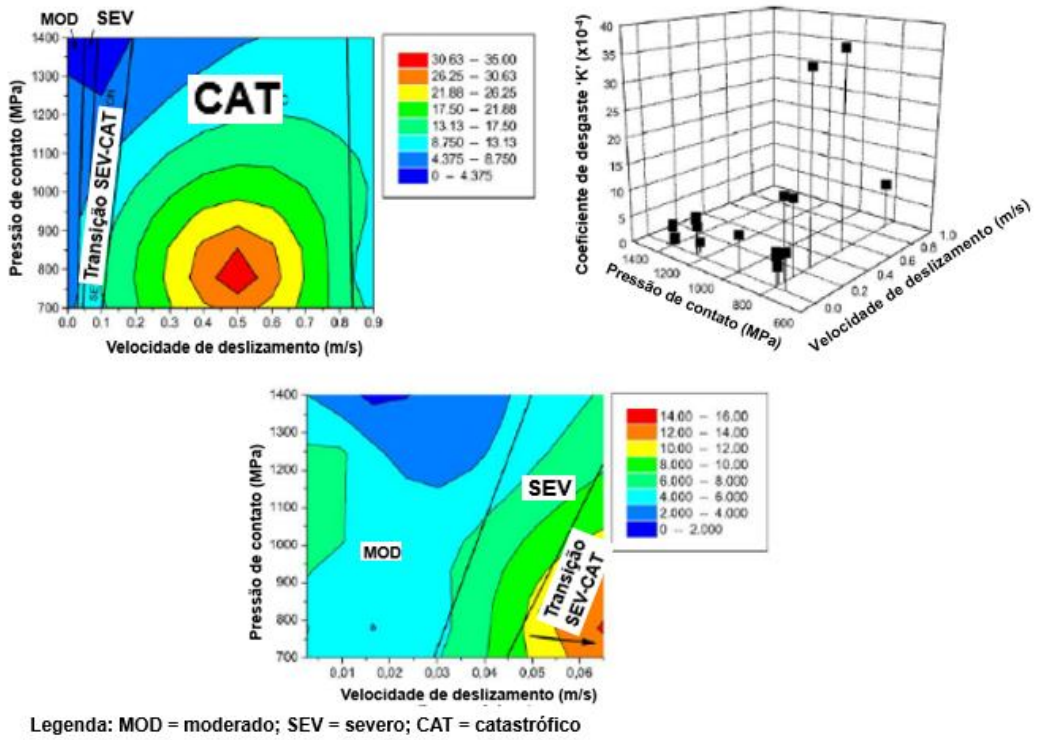


Figura 2.56 – Mapas de desgaste: trilho UIC60 900A e roda R7. Ensaios pino-disco e *twin disc*. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2004. Dados de OLOFSSON e TELLISKIVI, 2003).

Os ensaios em pequena escala mostraram um alto incremento na taxa de desgaste, quando da transição de regime moderado para severo e catastrófico. Tal transição, de acordo com Lewis e Olofsson (2004), ocorre em temperaturas de contato entre 200°C e 300°C (Figura 2.57). Eles sugeriram que estas temperaturas podem ser os ativadores das mudanças nas taxas, pois causam uma queda na tensão de escoamento de aços carbono similares aos usados em trilhos.

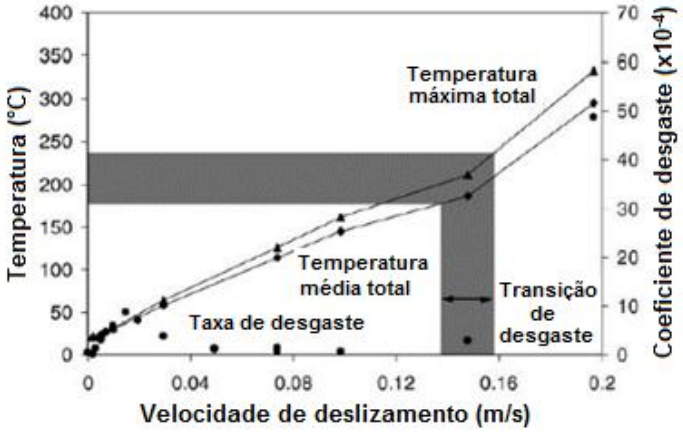


Figura 2.57 – Temperaturas de contato e coeficientes de desgaste para ensaios em *twin* disc com trilhos UIC60 900A e roda R8T. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2004).

Lewis e Olofsson (2004) sobrepuseram o mapa de desgaste dos ensaios com materiais de trilho UIC60 900A e roda R7 (pesquisa de Olofsson e Telliskivi, 2003) ao gráfico com as condições de contato, de forma a relacioná-los, como pode ser visto na Figura 2.58. É possível concluir que o contato topo do boleto com o passeio da roda gera desgaste entre os regimes moderado e severo e que o contato do canto de bitola com o friso da roda gera um desgaste nos regimes severo ou catastrófico.

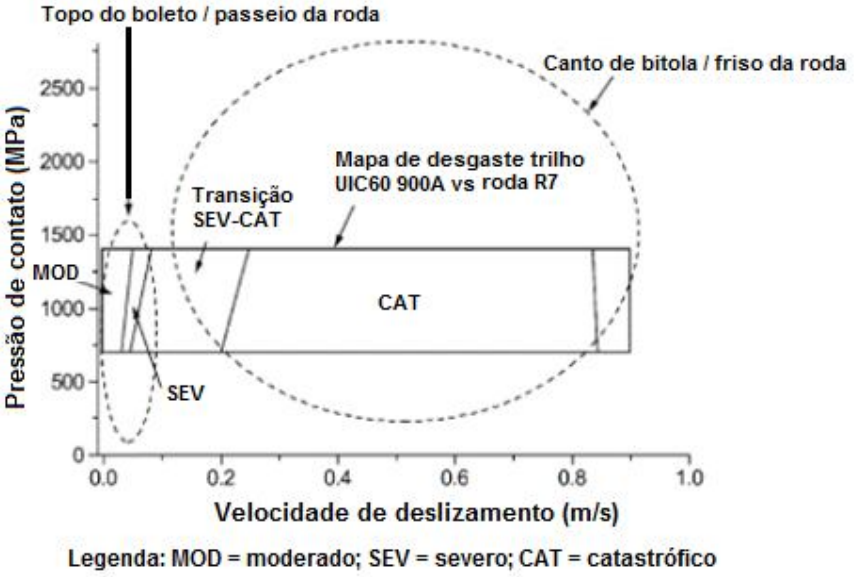


Figura 2.58 – Mapa de desgaste dos ensaios com materiais de trilho UIC60 900A e roda R7 sobre gráfico com as condições de contato roda-trilho da ferrovia de Estocolmo. Fonte: adaptado de (LEWIS e OLOFSSON, 2004).

2.7.5. Definição de parâmetros dos ensaios para EFVM

Conforme visto em todo capítulo 2.7, ensaios em laboratório são úteis para o entendimento dos mecanismos de desgaste da ferrovia. A velocidade de deslizamento tem maior influência sobre as taxas de desgaste do que o material empregado e a pressão de contato. Há uma lacuna no conhecimento atual em termos de dados e mecanismos de desgaste de rodas e trilhos, especialmente no contato canto de bitola com friso da roda. Sundh *et al* (2008) identificaram a carência de pesquisas utilizando condições de contato típicas do ataque do friso da roda ao canto de bitola do trilho, comparando com as pesquisas que tipificam o contato do passeio da roda com o topo do boleto. A maior concentração de estudos na segunda condição é mostrada no gráfico abaixo, que contém também

os parâmetros definidos por estes autores para sua pesquisa, destacados em vermelho na Figura 2.59.

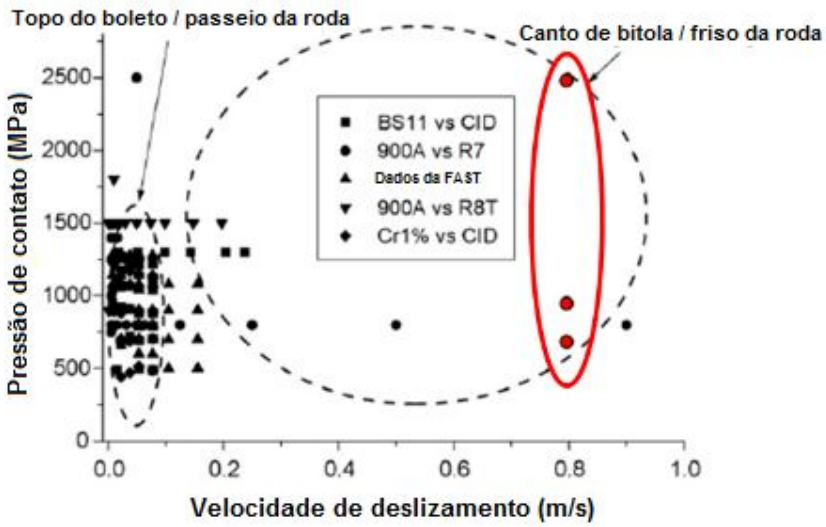


Figura 2.59 – Dados de contato de diversas pesquisas na área de roda-trilho sobrepostos ao gráfico típico das condições de contato da ferrovia sueca. Fonte: adaptado de (SUNDH *et al*, 2008).

O ensaio na configuração pino-disco é o mais adequado para estudo do desgaste para o contato do friso da roda com o canto de bitola. Diante deste cenário, decidiu-se trabalhar com os seguintes parâmetros, de modo a melhor representar as condições de contato típicas da ferrovia EFVM, que possui grande quantidade de curvas de raio pequeno (30% das curvas tem raios menores do que 330 metros):

- Pressão de contato nominal de 1,5 GPa;
- Velocidades de deslizamento de 0,1 m/s e 0,9 m/s.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Discos

Os discos foram confeccionados a partir de rodas fundidas e forjadas classe C da norma AAR, com a superfície de desgaste posicionada paralelamente à pista de rolamento. De acordo com a norma, a faixa de dureza destas rodas é de 321 a 363 Brinell. Sua composição química está apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química das rodas classe C da norma AAR.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
0,67-0,77	**0,60-0,90**	**0,15-1,00**	**Máx. 0,03**	**0,005-0,040**

Fonte: adaptado da norma AAR (2014).

Nas Figuras 3.1 e 3.2 podem ser observados a posição de retirada dos discos nas rodas e seu desenho técnico:

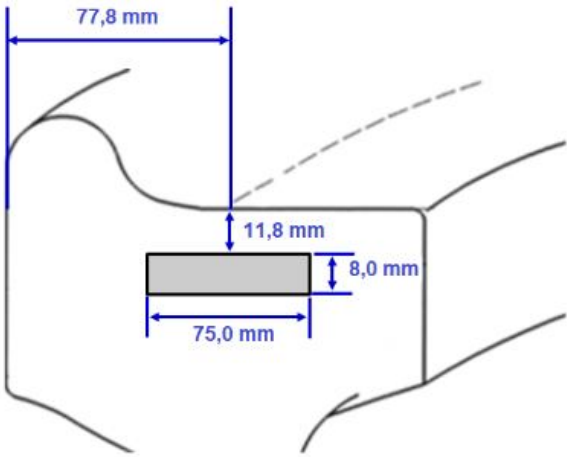


Figura 3.1 – Desenho esquemático com a posição de retirada dos discos nas rodas (fora de escala). Fonte: Autor.

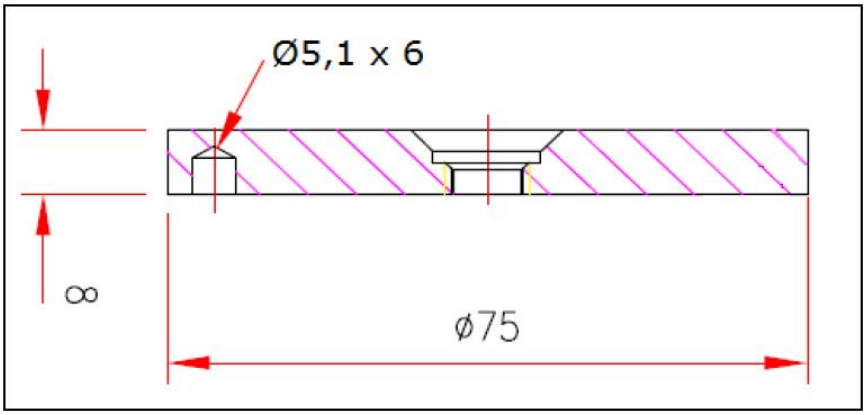


Figura 3.2 – Desenho técnico dos discos utilizados nos ensaios. Dimensões em mm. Fonte: (FALQUETO, 2015).

3.1.2. Pinos

Os pinos utilizados em todos os ensaios foram fabricados a partir do trilho perlítico convencional da EFVM. Tratam-se de trilhos tratados termicamente na região do boleto e cuja dureza especificada é de 370 Brinell. Sua composição química é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química dos trilhos perlíticos utilizados nos ensaios.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]
0,72-0,82	**0,80-1,25**	**0,10-0,50**	**Máx. 0,03**	**Máx. 0,02**	**Máx. 0,25**

Fonte: adaptado do catálogo da JFE Steel Corporation (2016)

Os pinos foram usinados a partir do boleto dos trilhos e tiveram a extremidade arredondada, no intuito de aumentar a pressão de contato nominal dos ensaios, além de evitar possível efeito de borda e falta de paralelismo no contato do pino com o disco. A posição de retirada dos pinos foi perpendicular ao comprimento dos trilhos, como mostrado na Figura 3.3.

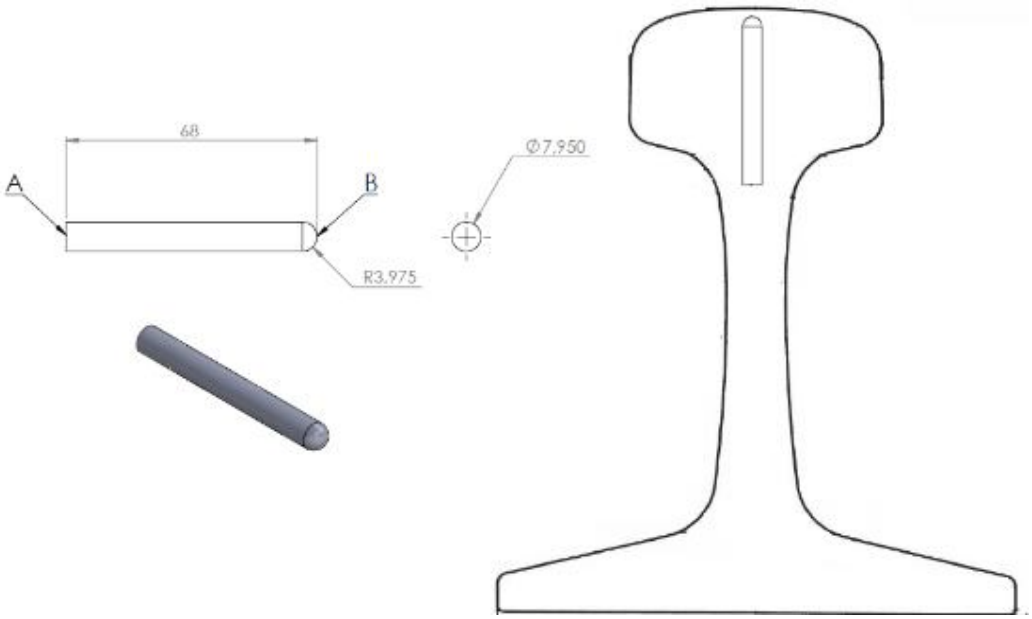


Figura 3.3 – Desenho esquemático dos pinos utilizados nos ensaios e sua posição de retirada no trilho (fora de escala). Dimensões em mm. Fonte: Autor.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Caracterização das amostras

A fim de verificar a possível influência dos diferentes materiais utilizados nos ensaios, foram analisadas as microestruturas dos discos e pinos. Para isso, as amostras passaram pelos processos de: corte, embutimento, lixamento (lixas #320, #600, #800 e #1200) e polimento com solução de diamante de 3 µm em suspensão. As superfícies foram atacadas com Nital a 2% e 3%.

Para a observação das microestruturas foram utilizados o microscópio óptico Nikon ECLIPSE MA200, do Laboratório de Tribologia, Materiais e Corrosão (TRICORRMAT) e o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) EVO 40XVP da Zeiss, localizado no Laboratório de Caracterização de Superfícies e Materiais (LCSM), ambos da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), além do MEV com canhão de efeito de campo – FEG – Inspect 50, do Laboratório de Microscopia Eletrônica e de Força Atômica da Universidade de São Paulo (LabMicro/USP).

As medições de dureza Vickers dos pinos e discos foram realizadas com o Durômetro Wolpert HT, localizado no TRICORRMAT/UFES. Foi utilizada a carga

de 10 kgf, com 6 repetições para cada amostra. Com o objetivo de comparar a dureza dos discos e a especificação da norma AAR para rodas classe C, a dureza Brinell também foi medida, utilizando o mesmo durômetro, com carga de 187,5 kgf e 11 repetições para cada amostra. Foram tomadas medidas de dureza Vickers dos discos também no durômetro Shimadzu do Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia (LTM/UFU). As medições aconteceram na face superior e na seção transversal dos discos, com carga de 30 kgf e 6 repetições para cada amostra.

3.2.2. Ensaio de deslizamento pino-disco

Os ensaios tribológicos foram realizados no TRICORRMAT/UFES. O tribômetro utilizado foi o Phoenix Plint TE67, configuração pino-disco, sem lubrificação.

Os seguintes parâmetros foram utilizados nos ensaios:

- Carga de 24,6 N. Aplicação por peso morto;
- Duas velocidades tangenciais de deslizamento: 0,1 m/s e 0,9 m/s, obtidas com rotações de 34 rpm e 306 rpm, respectivamente;
- Raio da trilha de desgaste de 28 mm para todos os ensaios;
- Duração de 1 hora em todos os ensaios;
- Distâncias de deslizamento de 358 metros (referente à velocidade de deslizamento de 0,1 m/s) e 3227 metros (referente à velocidade de deslizamento de 0,9 m/s);
- 2 tipos de material para os discos (fundidos e forjados) e 1 para o pino (aço perlítico);
- Mínimo de 3 ensaios para cada condição.

A carga de 24,6 N foi utilizada a fim de obter uma pressão nominal de contato máxima de 1,5 GPa. Cálculo foi realizado a partir da Equação (2.4), onde:

W = carga normal aplicada – 24,6 N;

R_e = raio da esfera – 3,975 mm;

E = módulo de elasticidade do aço – considerado valor de 200 GPa;

πa^2 = área de contato entre esfera e plano – calculada em 0,0162 mm².

A pressão de contato é obtida pela carga normal dividida pela área calculada.

Foi realizado o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar, com auxílio de termo-higrômetro digital. A temperatura dos ensaios foi de 22 °C ± 3 °C e a umidade relativa ficou em 55% ± 10%.

Todas as amostras foram limpas com álcool e acetona antes da realização dos ensaios. Após os ensaios, os *debris* gerados foram coletados com o auxílio de fita de cobre adesiva, para análise posterior no MEV.

As curvas do coeficiente de atrito foram obtidas como respostas dos ensaios, a partir do monitoramento da força de atrito com taxa de aquisição de dados de 1 Hz, através de célula de carga devidamente calibrada.

A Figura 3.4 mostra o tribômetro montado e o detalhe do contato entre pino e disco durante ensaio:

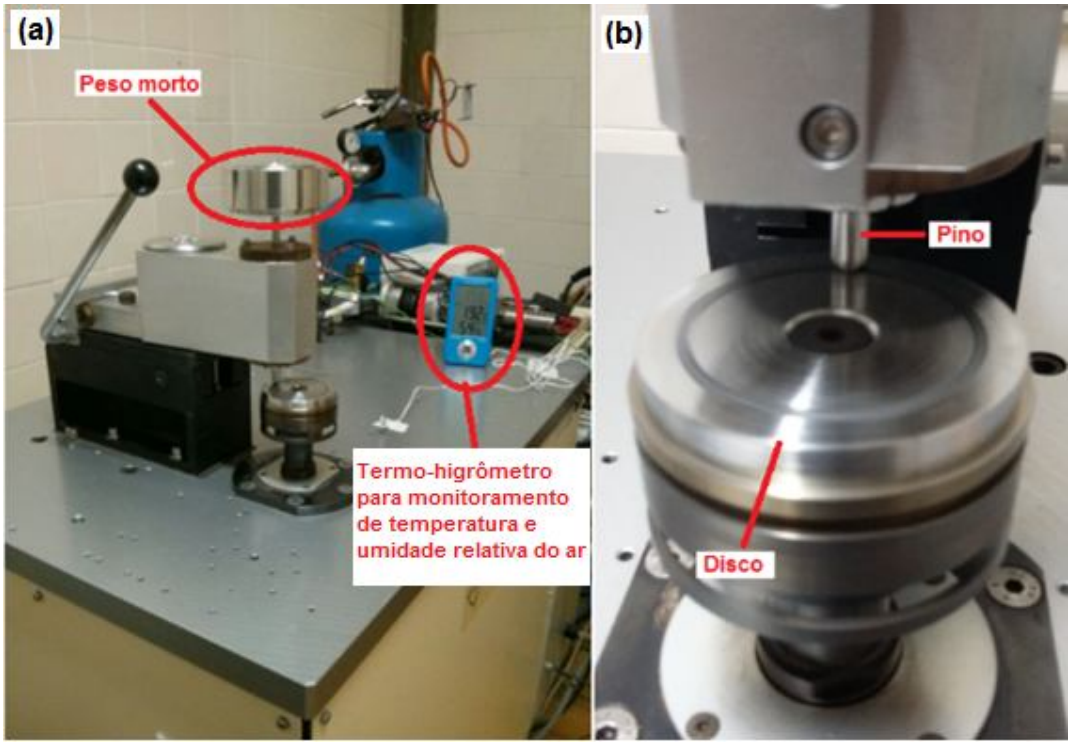


Figura 3.4 – (a) Configuração do ensaio com tribômetro Phoenix Plint TE67 do TRICORRMAT/UFES e (b) detalhe do contato entre pino e disco. Fonte: Autor.

3.2.3. Avaliação de desgaste dos discos

O volume desgastado dos discos foi obtido com o auxílio do analisador tridimensional de superfícies Talysurf CCI, da Taylor Hobson AMETEK Ultra Precision Technologies, localizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície da Universidade de São Paulo (LFS/USP), que realiza medição por

interferometria. Para cada disco, foram traçados 8 perfis, conforme indicado na Figura 3.5:

Figura 3.5 – Esquema com as posições das medições dos perfis topográficos da trilha de desgaste do disco, para cálculo do volume desgastado. Fonte: Autor.

Os perfis foram analisados com o programa TalyMap Gold. Para cada perfil, calculou-se a área da seção transversal da trilha de desgaste, considerando somente os vales, como pode ser observado no exemplo da Figura 3.6. A área média dos 8 perfis foi multiplicada pelo comprimento da circunferência da trilha de desgaste, obtendo-se então o volume desgastado por disco.

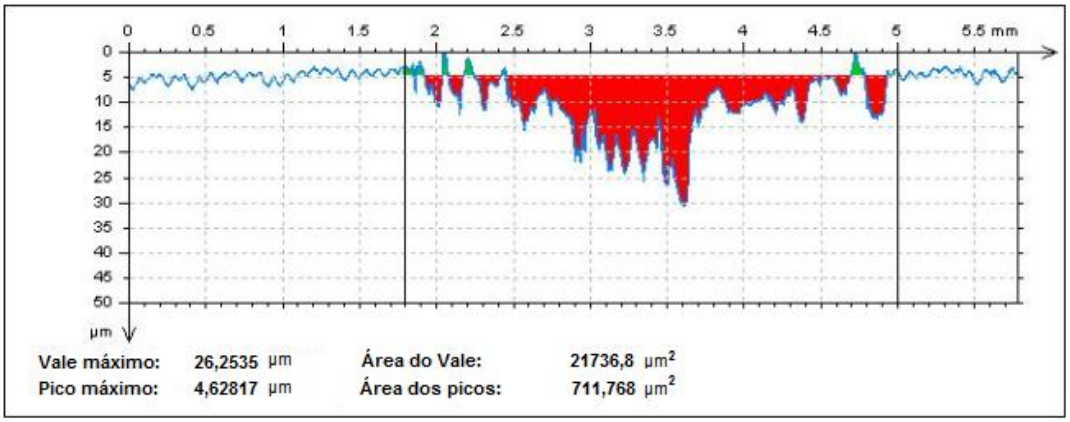


Figura 3.6 – Exemplo de medição do perfil da trilha de desgaste, para cálculo do volume desgastado através das medidas da área da seção transversal, destacada em vermelho na figura. Fonte: Autor.

3.2.4. Avaliação de desgaste dos pinos

O volume desgastado dos pinos foi calculado com base na norma ASTM G99 de 2010, por meio das equações para determinar o volume desgastado de esferas:

$$h_e = R_e - \sqrt{(R_e^2 - r_e^2} \qquad (3.1)$$

$$V_e = \frac{\pi h_e}{6}\,(3r_e^2 + h_e^2) \qquad (3.2)$$

Onde:

h_e: altura da calota esférica removida pelo desgaste;

r_e: raio da calota esférica removida pelo desgaste;

R_e: raio da esfera;

V_e: volume total desgastado da esfera.

Considerando então a semi-esfera da extremidade desgastada dos pinos, foi possível calcular o volume desgastado a partir da medição do raio da calota removida pelo desgaste, como pode ser visto no desenho esquemático da Figura 3.7.

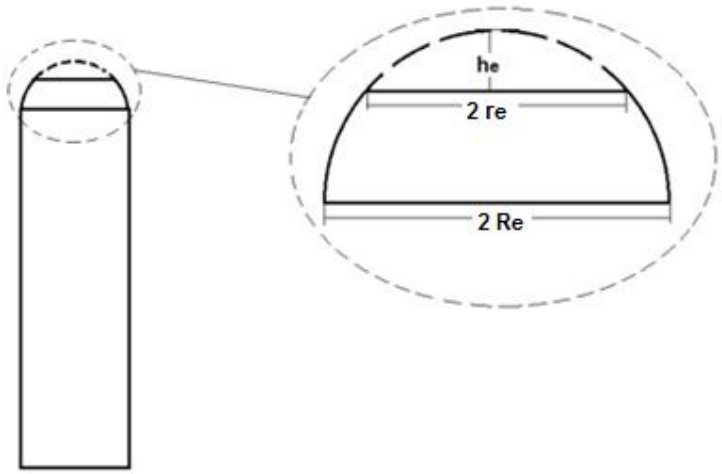


Figura 3.7 – Desenho esquemático do pino desgastado, com os parâmetros utilizados no cálculo do volume de desgaste (fora de escala). Fonte: Autor.

As medições dos raios das calotas foram realizadas com auxílio do microscópio estereoscópico Zeiss, localizado no LCSM/UFES. A Figura 3.8 mostra um exemplo de medição do raio da calota.

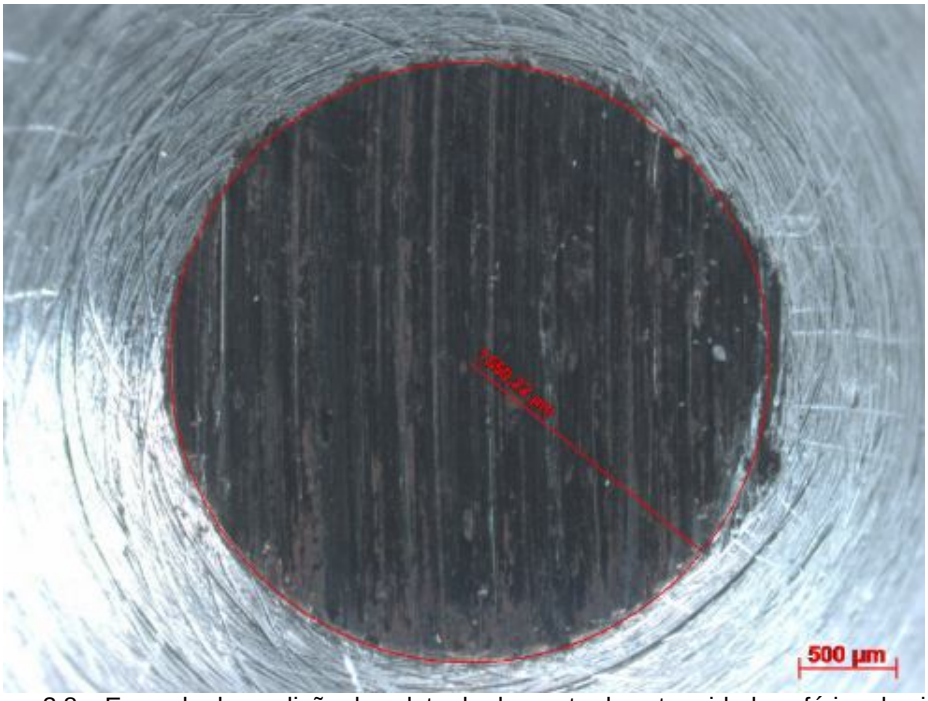


Figura 3.8 – Exemplo de medição da calota de desgaste da extremidade esférica do pino.
Fonte: Autor.

3.2.5. Avaliação dos mecanismos de desgaste

Os mecanismos de desgaste dos discos e pinos foram estudados através de avaliações no microscópio estereoscópico e no MEV, localizados no LCSM/UFES.

Foram obtidas diversas imagens das superfícies desgastadas, com diferentes aumentos escolhidos a fim de se identificar os mecanismos de dano presentes nos ensaios de deslizamento. Os *debris* recolhidos nos ensaios foram analisados no MEV, com o objetivo de complementar a avaliação do desgaste, analisando sua severidade, através da caracterização da morfologia e dimensões.

3.2.6. Avaliação da influência do encruamento dos discos

A fim de verificar a possível influência do encruamento dos discos no desgaste dos discos e pinos, foram medidos os perfis de microdureza da seção transversal de 4 discos ensaiados, um para cada condição definida, abaixo da trilha de desgaste. Para tal foi utilizado o microdurômetro PANTEC do TRICORRMAT/UFES. Foram tomadas 6 medidas por disco, em diferentes profundidades, com carga de 0,05 kgf.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Microestrutura

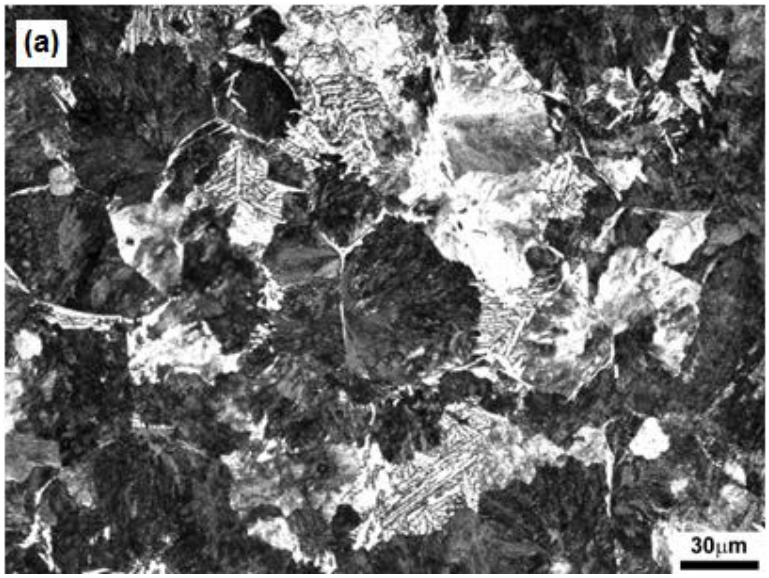
4.1.1.1. Discos

As microestruturas dos discos fundidos e forjados são mostradas nas Figuras 4.1 a 4.4.

Os discos fundidos apresentaram microestrutura heterogênea, com algumas regiões constituídas predominantemente por perlita fina e outras por bainita superior, com morfologias bem definidas. Foi observada também a presença de ferrita nos contornos de grão.

A Figuras 4.1 mostra duas diferentes regiões analisadas no microscópio óptico, ambas com formação de perlita fina (regiões escuras) e bainita superior (agulhas de ferrita e cementita), porém com quantidades distintas de cada constituinte. Mais imagens da microestrutura dos discos fundidos são exibidas no APÊNDICE A.

A Figura 4.2 apresenta uma imagem do disco fundido obtida no MEV. É possível identificar as presenças de perlita fina e bainita superior.



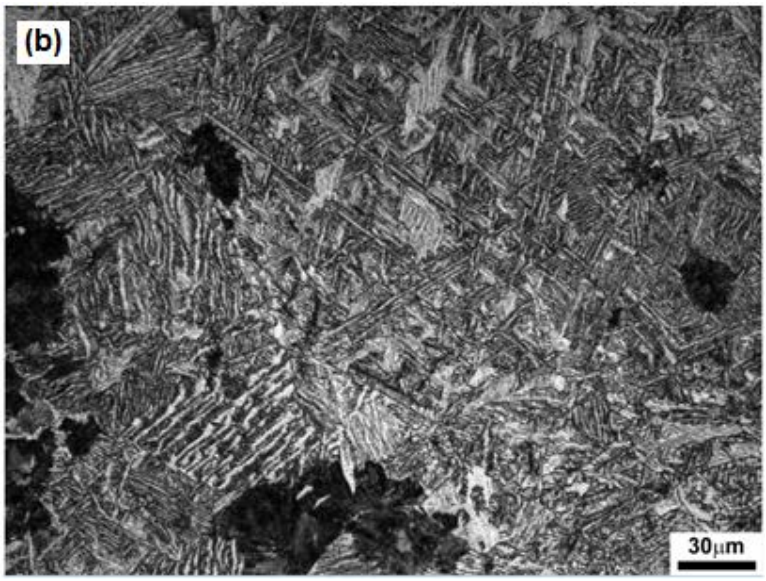


Figura 4.1 – Microestrutura do disco fundido obtida através de microscopia óptica, revelada com ataque de Nital 2%. Região (a) com fase predominante de perlita fina e região (b) com fase predominante de bainita superior. Fonte: Autor.

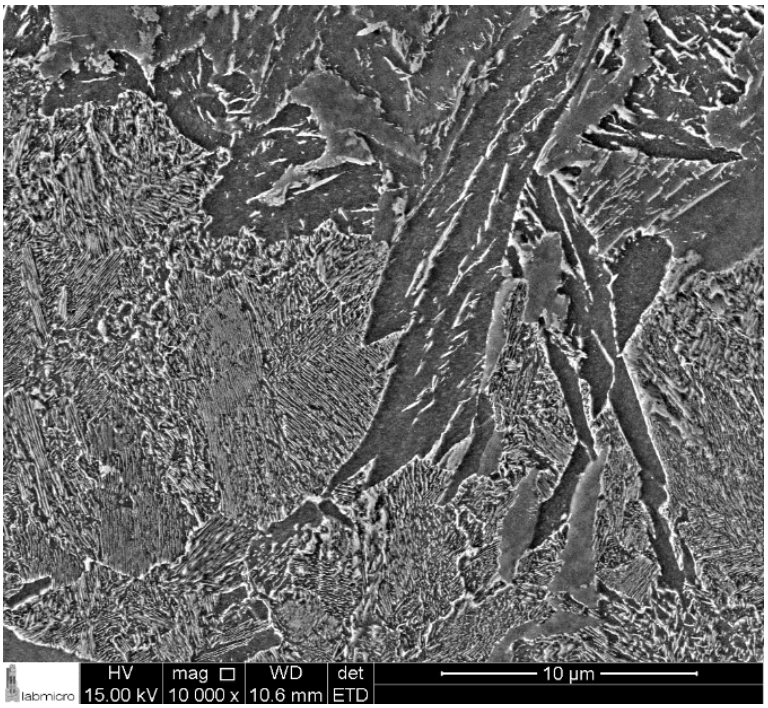


Figura 4.2 – Microestrutura do disco fundido obtida através do MEV, revelada com ataque de Nital 2%. Perlita na metade inferior e bainita na metade superior. Fonte: Autor.

Os discos forjados apresentaram uma microestrutura com distribuição de constituintes mais homogênea em relação ao material fundido, com colônias de perlita fina intercaladas com bainita e agregados de ferrita e carbonetos.

A Figura 4.3 mostra uma imagem da microestrutura do disco forjado, obtida através de microscópio óptico. No APÊNDICE B podem ser consultadas outras

imagens da microestrutura de discos forjados, que ilustram bem a melhor homogeneidade do material.

A Figura 4.4 apresenta uma imagem da microestrutura do disco forjado obtida no MEV. É possível observar a presença de perlita lamelar (clássica) e bainita misturadas, além de regiões com princípio de fragmentação da perlita, indicando a possível presença de perlita degenerada, cuja orientação das lamelas de ferrita e cementita é variável e que, de acordo com Furuhara *et al* (2007), pode se formar em aços eutetóides e hipoeutetóides em temperaturas de 500 °C a 600 °C.

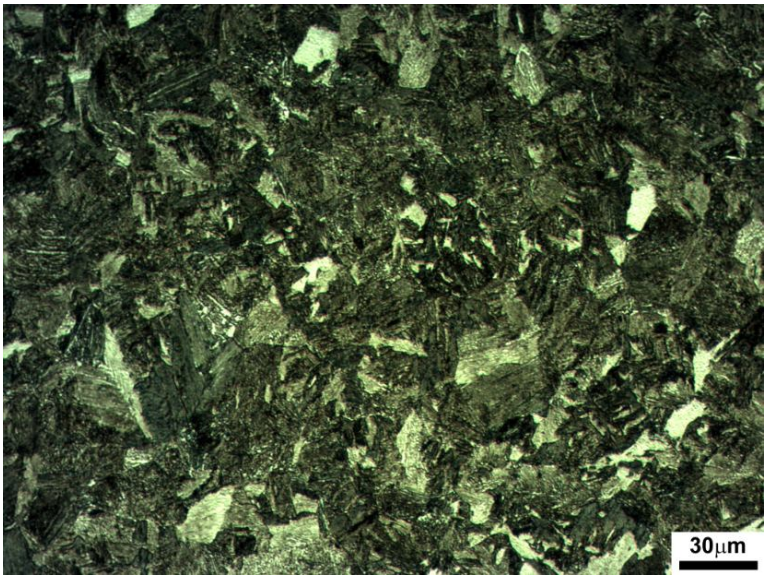


Figura 4.3 – Microestrutura do disco forjado obtida através de microscopia óptica, revelada com ataque de Nital 2. Fonte: Autor.

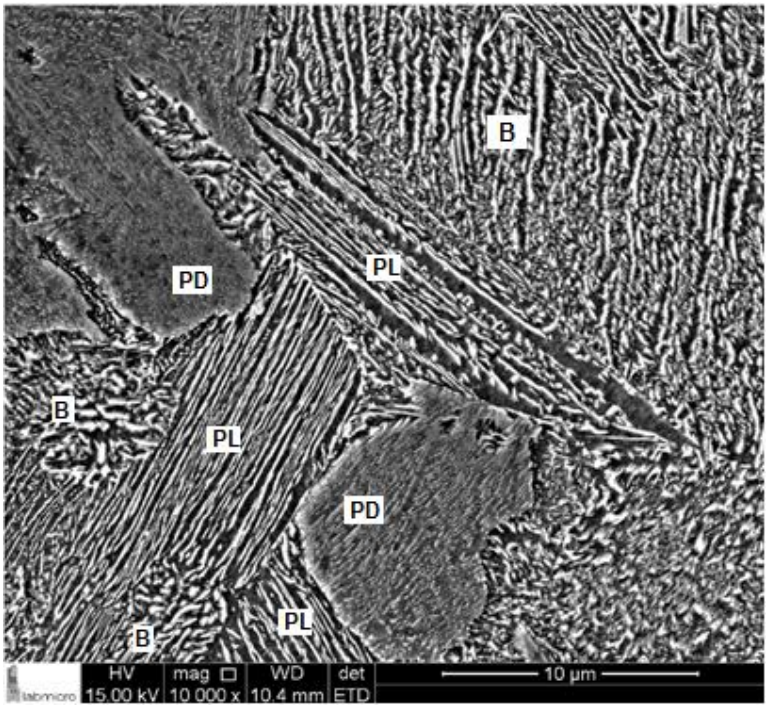


Figura 4.4 – Microestrutura do disco forjado obtida através do MEV, revelada com ataque de Nital 2%. Presença de perlita lamelar (PL) e bainita (B) misturadas, além de regiões com perlita degenerada (PD). Fonte: Autor.

Os discos fundidos e forjados apresentaram perlita fina em sua microestrutura, semelhante ao que fora encontrado por Maia *et al* (2010), apresentado na Figura 2.4(a), que analisou a microestrutura de rodas forjadas classe C da norma AAR, e por Freitas (2015), que analisou rodas fundidas e forjadas – Figura 2.5. Resultados similares foram encontrados também por He *et al* (2016) e Zeng *et al* (2016), como pode ser visto na Figura 2.6, sendo que estes últimos trabalharam com rodas de composição química similar à da classe A da norma AAR, cuja fração de carbono máxima é 0,57%, e que por este motivo apresentaram considerável formação de ferrita pró-eutetóide em sua microestrutura.

A ocorrência de bainita em regiões próximas à superfície do passeio havia sido identificada por Chaves (2017), ao analisar rodas fundidas e forjadas classe C da norma AAR – Figura 2.7. Minicucci (2017) avaliou a microestrutura de rodas forjadas classe D da norma AAR, cuja composição química é similar à classe C, porém com adição de outros elementos de liga, como nióbio. Identificou a presença de bainita e perlita a 10 mm de profundidade, a partir do passeio da

roda. Com 15 mm de profundidade, obteve uma microestrutura homogênea de perlita fina.

Chaves (2017) observou também a presença perlita degenerada ao trabalhar com amostras de aço 1080 tratadas em patamares isotérmicos de 475 °C e 500 °C, como mostra a Figura 4.5. Para patamares entre 525 °C e 700 °C, o mesmo aço apresentou microestruturas totalmente perlíticas.

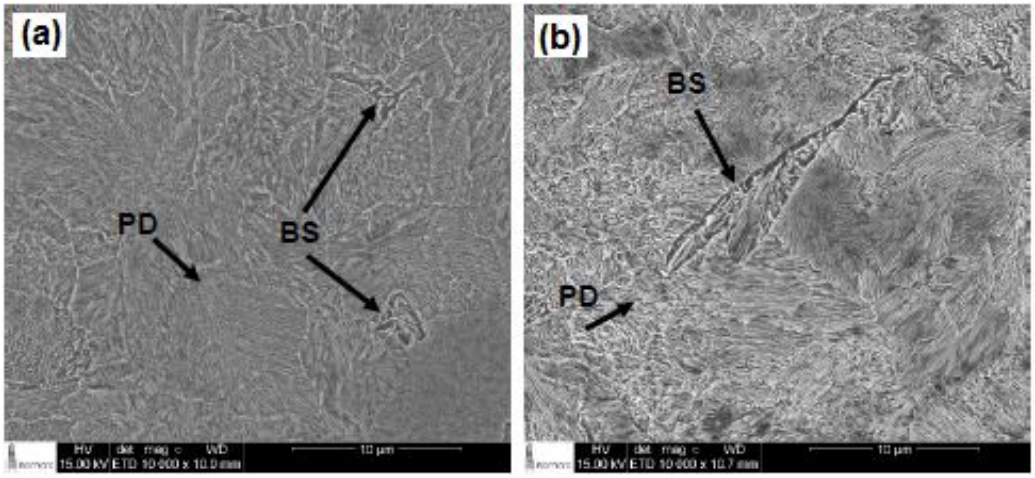


Figura 4.5 – Microestruturas obtidas em MEV para aços 1080 tratados em patamares isotérmicos de (a) 475 °C e (b) 500 °C. Observada presença de perlita degenerada (PD) e bainita superior (BS). Fonte: adaptado de (CHAVES, 2017).

Com relação à microestrutura, a principal constatação do trabalho atual foi detectar a presença de bainita nos discos fundidos e forjados – retirados das rodas em profundidades entre 11,8 e 19,8 mm a partir da pista de rolamento – e da perlita degenerada nos discos forjados, microconstituinte não observado pelos autores citados, ao analisarem amostras confeccionadas a partir de rodas e trilhos.

4.1.1.2.Pinos

A microestrutura típica do material dos pinos utilizados é apresentada na Figura 4.6. Nota-se a presença de uma microestrutura predominantemente perlítica, semelhante à caracterização apresentada por Macedo *et al* (2001).

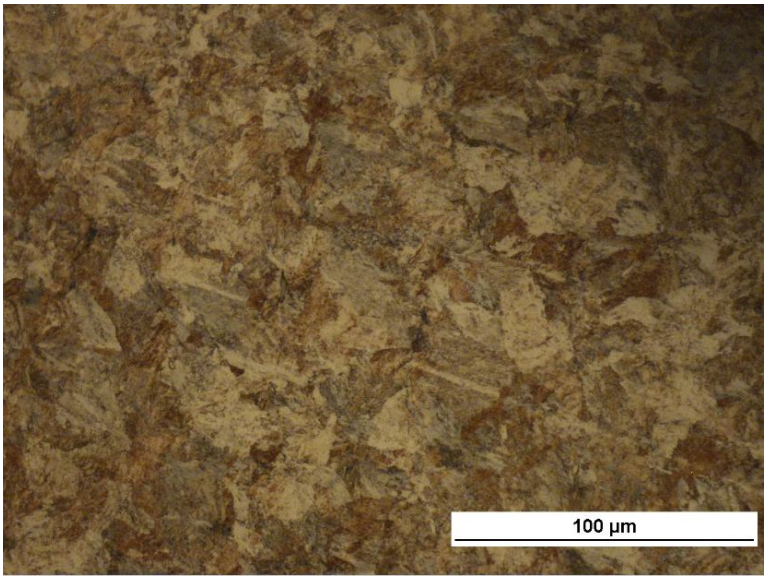


Figura 4.6 – Microestrutura do pino, revelada com ataque de Nital 3%. Fonte: Autor.

4.1.2. Dureza

Os resultados de dureza de pinos e discos na escala Vickers, com carga de 10 kgf, são apresentados na Figura 4.7.

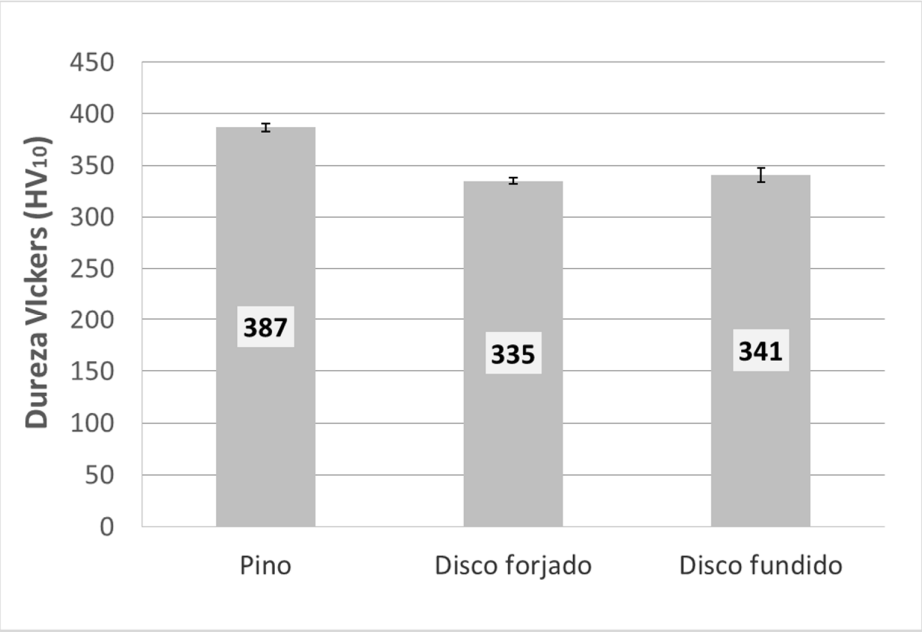


Figura 4.7 – Resultados de dureza Vickers dos pinos e discos, carga de 10 kgf. Fonte: Autor.

Os diferentes materiais dos discos apresentaram valores muito próximos, indicando que as diferenças observadas na microestrutura não tiveram efeito significativo na macro dureza dos materiais.

Os resultados de dureza Brinell para os discos fundidos e forjados são apresentados na Figura 4.8. Os dois materiais estão com medidas de dureza dentro da faixa especificada para rodas classe C da norma AAR, como pode ser visto na Tabela 4.1.

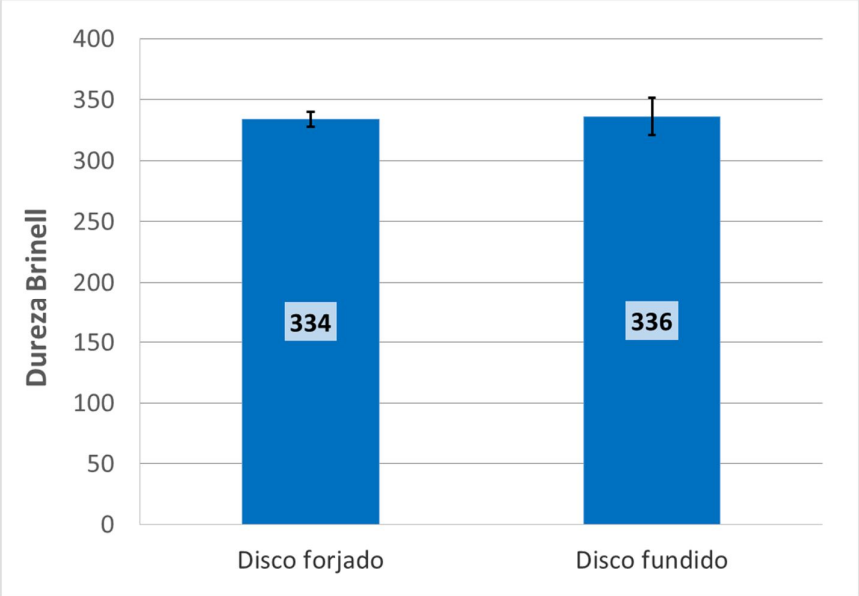


Figura 4.8 – Resultados de dureza Brinell dos discos, carga de 187,5 kgf. Fonte: Autor.

Tabela 4.1 – Faixa de dureza Brinell para rodas ferroviárias.

Classe	Dureza mínima	Dureza máxima
L	**197 Brinell**	**277 Brinell**
A	**255 Brinell**	**321 Brinell**
B	**302 Brinell**	**341 Brinell**
C	**321 Brinell**	**363 Brinell**
D	**341 Brinell**	**415 Brinell**

Fonte: adaptado da norma AAR (2014).

Os resultados obtidos para dureza Vickers com carga de 30 kgf, para os discos, tanto na superfície a ser ensaiada quanto na seção transversal, estão apresentados no APÊNDICE C.

4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

4.2.1. Atrito

A observação do coeficiente de atrito (μ) durante o deslizamento é importante para caracterizar o comportamento do par tribológico. Através dele é possível

associar a resistência ao movimento, à quebra e formação de filmes óxidos e às mudanças e transições de mecanismos de desgaste. Estes fenômenos podem ser representados pelas variações nas curvas de coeficiente de atrito em função do tempo (ZUM GAHR, 1987; HUTCHINGS, 1992).

Foi analisado o comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo, para as diferentes condições de ensaios.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os gráficos dos ensaios realizados à velocidade de 0,1 m/s, para sistemas com discos fundidos e forjados, respectivamente. No ensaio com discos fundidos, o coeficiente de atrito após o período de *running-in* variou entre 0,5 e 0,7. Nos ensaios com discos forjados o comportamento foi semelhante, porém em um nível de atrito um pouco inferior, entre 0,4 e 0,6. Neste último caso, os valores do coeficiente de atrito demoraram cerca de 1500 segundos para se estabilizarem.

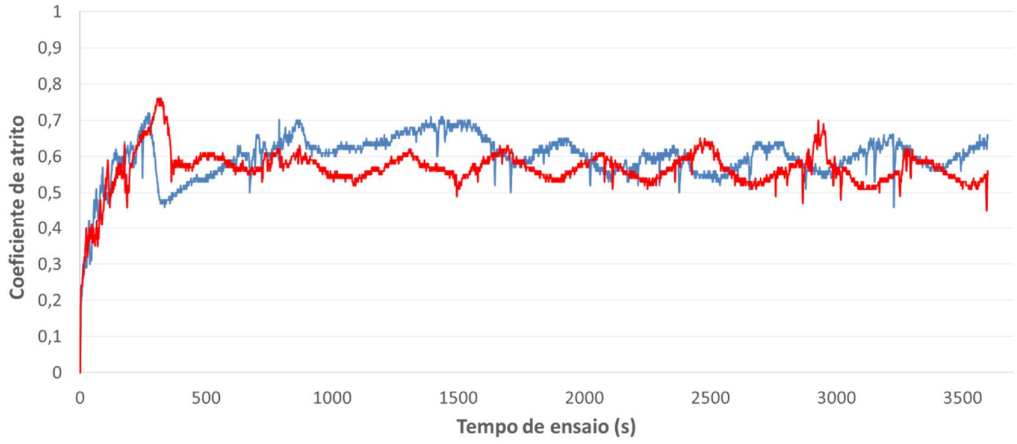


Figura 4.9 – Gráfico do coeficiente de atrito dos ensaios com discos fundidos e velocidade de deslizamento de 0,1 m/s. Fonte: Autor.

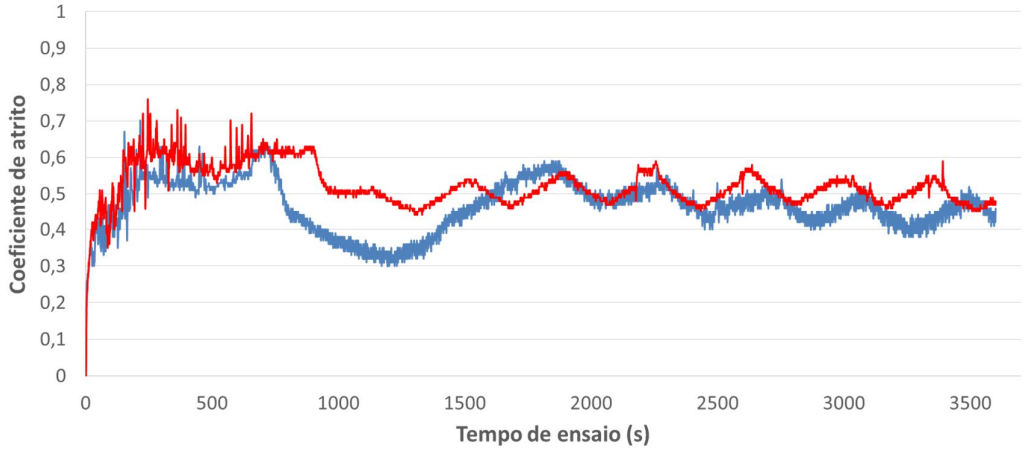


Figura 4.10 – Gráfico do coeficiente de atrito dos ensaios com discos forjados e velocidade de deslizamento de 0,1 m/s. Fonte: Autor.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 são mostrados os gráficos dos ensaios realizados à velocidade de 0,9 m/s, para sistemas com discos fundidos e forjados, respectivamente. Nos ensaios com discos fundidos, μ se estabilizou relativamente entre 0,7 e 0,9, com valores mínimos chegando a 0,4, enquanto que nos ensaios com discos forjados, μ variou geralmente entre 0,7 e 0,8, com valores mínimos até 0,4 e máximos até 0,9.

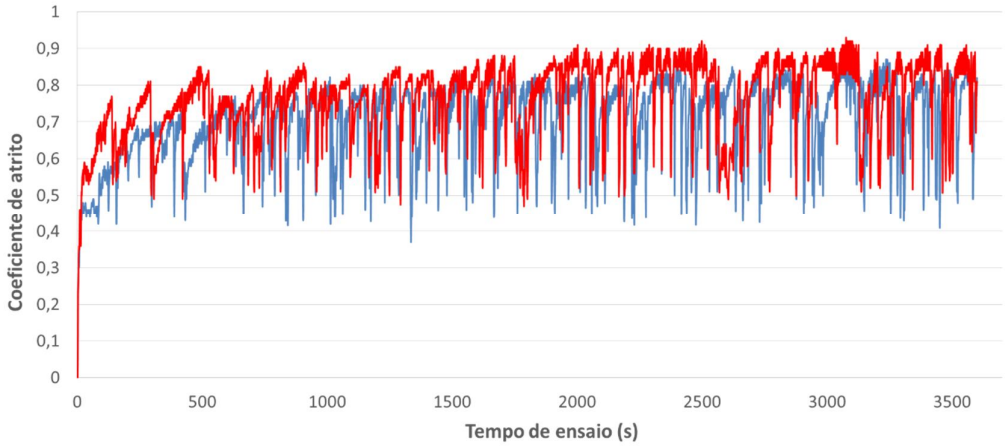


Figura 4.11 – Gráficos do coeficiente de atrito dos ensaios com discos fundidos e velocidade de deslizamento de 0,9 m/s. Fonte: Autor.

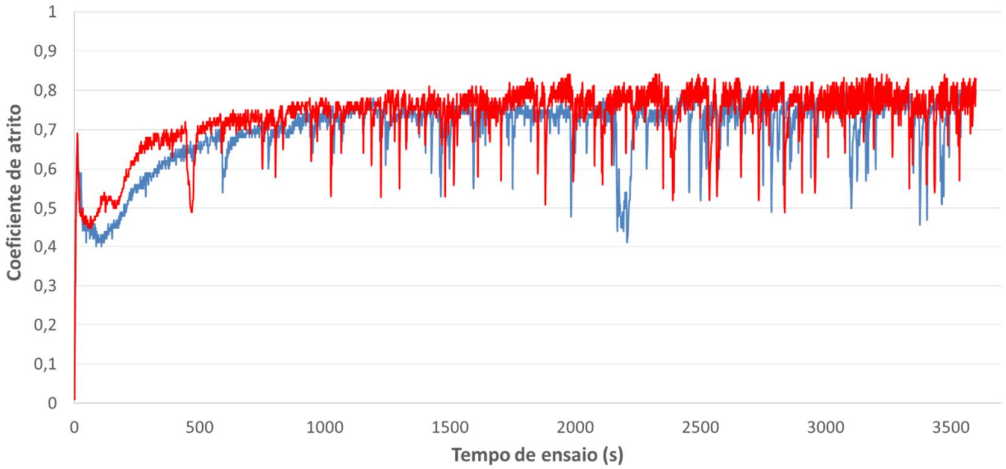


Figura 4.12 – Gráficos do coeficiente de atrito dos ensaios com discos forjados e velocidade de deslizamento de 0,9 m/s. Fonte: Autor.

Com a sobreposição das curvas, percebe-se boa repetibilidade no comportamento do coeficiente de atrito em todas as condições de ensaio. De acordo com as Figuras 4.9 a 4.12, pode-se observar que os ensaios com velocidade de deslizamento de 0,1 m/s apresentaram resultados de coeficiente de atrito menores do que para velocidades de 0,9 m/s.

A Figura 4.13 apresenta os resultados do coeficiente de atrito médio para as diferentes velocidades e diferentes materiais do disco. Os valores foram calculados desconsiderando os primeiros 1500 segundos de cada ensaio, de forma a garantir que todos haviam passado pelo período de *running-in* do atrito.

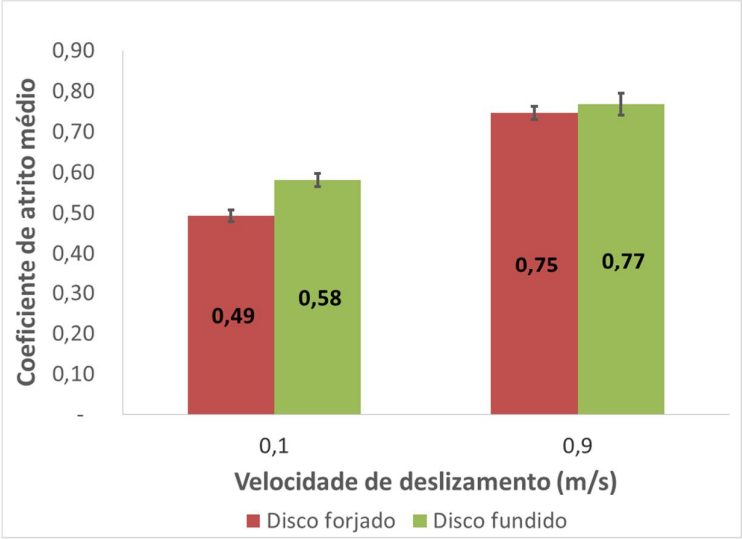


Figura 4.13 – Valores médios do coeficiente de atrito. As barras representam a variação dos valores de μ: 2 medidas para cada configuração. Fonte: Autor.

Estudos do comportamento tribológico para o contato roda-trilho, realizados na configuração *twin disc*, encontraram valores de μ entre 0,5 e 0,7, para materiais similares aos deste trabalho (BOLTON e CLAYTON, 1984; DANKS e CLAYTON, 1987).

Olofsson e Telliskivi (2003) encontraram valores similares de coeficiente de atrito – também entre 0,5 e 0,6 – nos ensaios pino-disco a seco e com amostras confeccionadas a partir de materiais de trilhos e rodas, assim como Viáfara *et al* (2005), que obtiveram valores próximos a estes com diferentes cargas.

Nos ensaios com materiais e condições ambientais – temperatura e umidade relativa – similares às do presente trabalho, Zhu *et al* (2015) obtiveram coeficiente de atrito de aproximadamente 0,45, como pode ser visto na Figura 2.52, valor muito próximo ao do par pino-disco forjado ensaiado à velocidade de deslizamento de 0,1 m/s e um pouco abaixo do par pino-disco fundido na mesma velocidade. Vale ressaltar que Zhu *et al* (2015) utilizaram a velocidade de 0,01 m/s, bem abaixo das duas utilizadas neste trabalho.

O aumento no coeficiente de atrito, de aproximadamente 0,5-0,6 para aproximadamente 0,8, com o aumento da velocidade de 0,1 m/s para 0,9 m/s, provavelmente ocorreu devido ao aquecimento dos pinos e discos na região de contato das asperezas, seguido de diminuição da resistência mecânica dos aços e, consequentemente, aumento da deformação plástica. Com o incremento de temperatura, há também uma tendência de maior oxidação no contato, o que tenderia a diminuir o coeficiente de atrito, havendo então uma competição entre estes dois fenômenos. Provavelmente, nestes ensaios, a deformação plástica teve maior efeito do que a oxidação.

Para a velocidade de deslizamento de 0,9 m/s, os ensaios com discos fundidos e forjados apresentaram resultados praticamente iguais para o coeficiente de atrito médio. Na velocidade de 0,1 m/s, os valores do coeficiente de atrito médio foram próximos, com um viés de menor atrito no contato do pino com o disco forjado.

4.2.2. Desgaste

Os resultados do coeficiente de desgaste dimensional *'k'* dos pinos e discos são apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15. Para efeito de comparação com a

literatura, os resultados de desgaste foram apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3 também pela taxa de desgaste e pelo coeficiente adimensional de desgaste 'K'. Os resultados obtidos neste trabalho são da mesma ordem de grandeza de outros exibidos por autores que também trabalharam com ensaios pino-disco com materiais de roda e trilho de composição similar.

Perez-Unzueta e Benyon (1993) calcularam uma taxa de desgaste de aproximadamente 1,200 x 10^{-3} mm³/m para pinos com dureza de 400 HV_{10}, confeccionados com material de trilho, deslizando contra discos fabricados com material de roda, a uma velocidade de 0,1 m/s, como mostra a Figura 2.32. No trabalho atual, nos ensaios com pino de dureza medida de 387 HV_{10}, à mesma velocidade de deslizamento, a taxa de desgaste do pino foi de 1,302 x 10^{-3} mm³/m no ensaio contra disco forjado e 0,418 x 10^{-3} mm³/m no ensaio contra disco fundido. A ressalva é que, no caso do trabalho de Perez-Unzueta e Benyon (1993), a carga foi sendo aumentada de modo a manter a pressão de contato sempre em 20 MPa.

Outros resultados que se aproximam dos obtidos na pesquisa atual foram os apresentados por Olofsson e Telliskivi (2003) e Lewis e Olofsson (2004), em relação ao coeficiente de desgaste adimensional. Para velocidades de deslizamento em torno de 0,1 m/s, foram observados valores de K variando entre 10 e 400 x10^{-4}. Para velocidades próximas de 0,9 m/s, os valores de K ficaram aproximadamente entre 2 e 9 x10^{-4}. No trabalho atual, os valores de K do pino ficaram em 58 x10^{-4} para o contato contra discos fundidos e 177 x10^{-4} para discos forjados, ambos à velocidade de 0,1 m/s. Já na velocidade de 0,9 m/s, os resultados de K foram de 27 x10^{-4} para os ensaios contra discos fundidos e 48 x10^{-4} contra discos forjados.

Tabela 4.2 – Resultados de desgaste dos discos fundidos e forjados.

Material do disco	Velocidade (m/s)	Coeficiente de desgaste dimensional k ($mm^3/m.N$)	Taxa de desgaste 'Q' ($x10^{-3}$ mm^3/m)	Coeficiente de desgaste adimensional K ($x10^{-4}$)
Fundido	0,1	5,00E-05	1,230	170
	0,9	1,91E-05	0,470	65
Forjado	0,1	1,33E-04	3,266	445
	0,9	3,42E-05	0,841	115

Notas: Q = volume desgastado / distância deslizada; k = Q/W; K = QH/W.
Fonte: Autor

Tabela 4.3 – Resultados de desgaste dos pinos em deslizamento contra discos fundidos e forjados.

Material do disco	Velocidade (m/s)	Coeficiente de desgaste dimensional k ($mm^3/m.N$)	Taxa de desgaste 'Q' ($x10^{-3}$ mm^3/m)	Coeficiente de desgaste adimensional K ($x10^{-4}$)
Fundido	0,1	1,70E-05	0,418	58
	0,9	7,81E-06	0,192	27
Forjado	0,1	5,29E-05	1,302	177
	0,9	1,43E-05	0,351	48

Notas: Q = volume desgastado / distância deslizada; k = Q/W; K = QH/W.
Fonte: Autor.

Diferentemente dos resultados apresentados por Bolton e Clayton (1984), após ensaios na configuração *twin disc* e exibidos nas Figuras 2.25 e 2.27, onde a mudança no material do corpo não refletiu em alteração significativa na taxa de desgaste do contracorpo, o desgaste dos pinos sofreu influência dos diferentes materiais do disco.

Comparando os resultados mostrados nas Figuras 4.14 e 4.15, percebe-se um comportamento muito similar entre o desgaste dos discos e pinos, sendo o desgaste maior para os ensaios com os discos forjados e essa diferença ficou mais acentuada na velocidade de deslizamento de 0,1 m/s do que em 0,9 m/s.

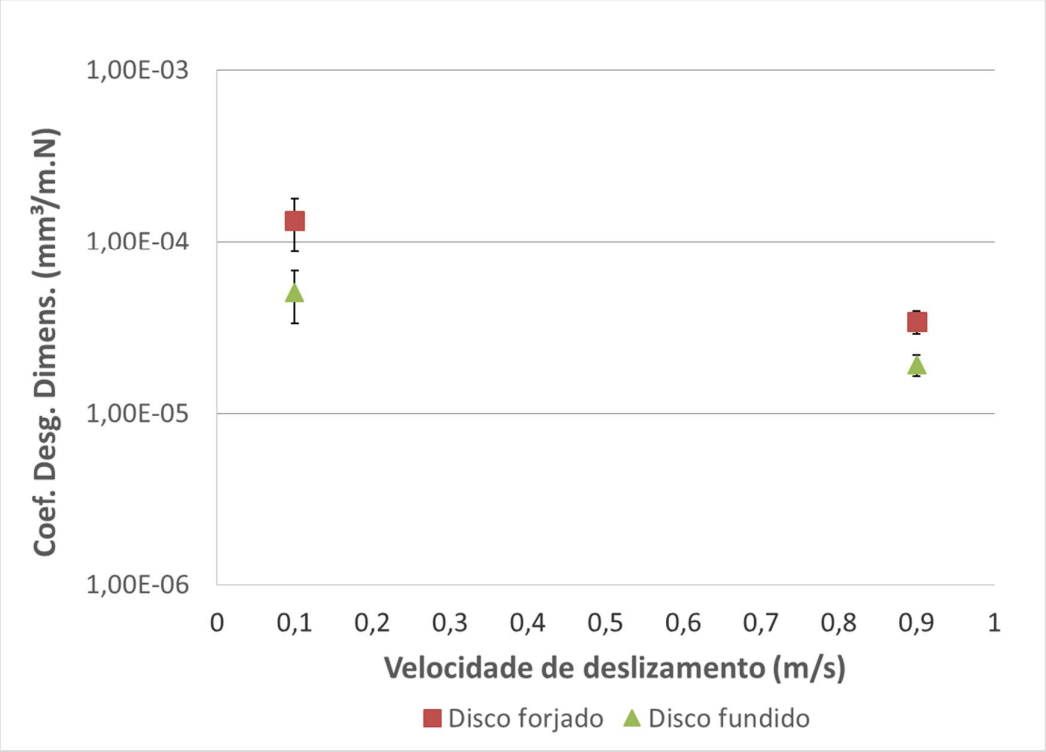


Figura 4.14 – Coeficiente de desgaste dimensional (mm³/m.N) dos discos fundidos e forjados, na escala logarítmica e em função da velocidade de deslizamento (m/s). Fonte: Autor.

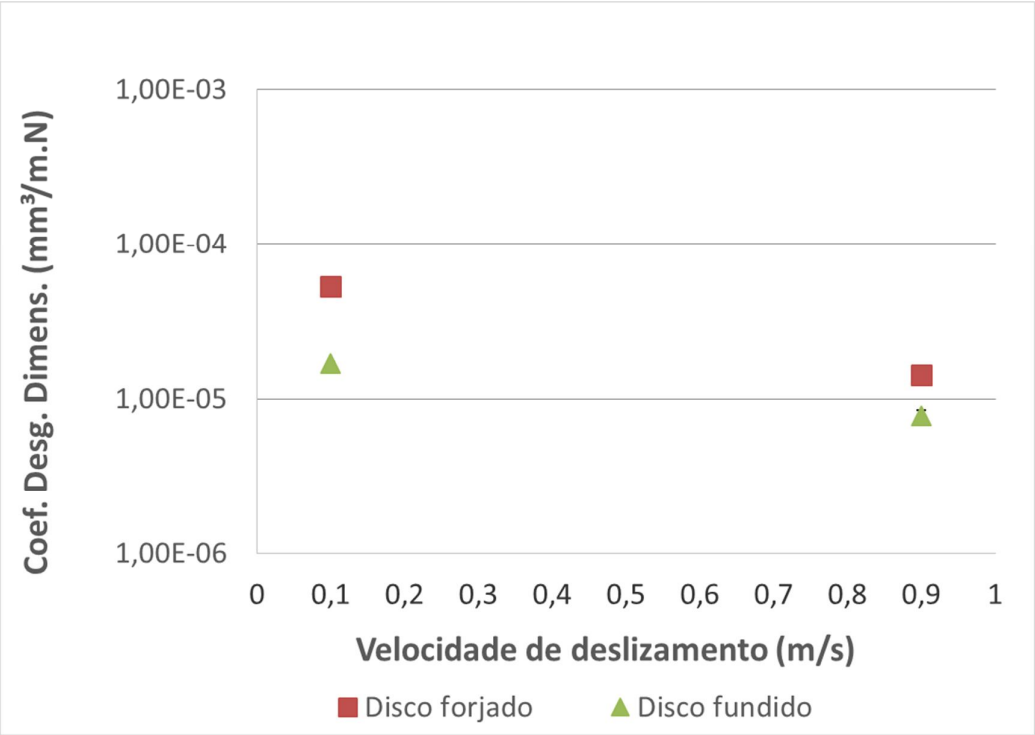


Figura 4.15 – Coeficiente de desgaste dimensional (mm³/m.N) dos pinos em deslizamento contra discos fundidos e forjados, na escala logarítmica e em função da velocidade de deslizamento (m/s). Fonte: Autor.

A Tabela 4.4 exibe a comparação entre os valores obtidos para o coeficiente de desgaste dimensional '*k*' dos pinos e discos nos sistemas com discos fundidos e forjados. Esta diferença ficou ainda mais acentuada na velocidade de 0,1 m/s, com o desgaste de pinos e discos aproximadamente 3 vezes maiores para os ensaios com discos forjados. Já na velocidade de 0,9 m/s, os sistemas com discos forjados apresentaram desgaste 80% maior tanto para os pinos quanto para os discos.

Tabela 4.4 – Comparação entre os valores obtidos para o coeficiente de desgaste dimensional '*k*' dos pinos e discos nos sistemas com discos fundidos e forjados.

Velocidade	Material do disco	Comparativo entre '*k*' dos discos (divisão pelo '*k*' do disco fundido)	Comparativo entre '*k*' dos pinos (divisão pelo '*k*' do sistema com disco fundido)
0,1 m/s	Fundido	1	1
	Forjado	2,7	3,1
0,9 m/s	Fundido	1	1
	Forjado	1,8	1,8

Fonte: Autor.

Conforme mostrado na seção 4.1.2, a dureza dos discos fundidos e forjados foi praticamente a mesma, não justificando, portanto, a maior severidade no desgaste nos sistemas com os discos forjados. Provavelmente, esta diferença de desgaste está relacionada com as diferentes microestruturas observadas nos discos fundidos e forjados, apresentadas na seção 4.1.1. A microestrutura heterogênea dos discos fundidos, para os tribossistemas estudados neste trabalho, teria favorecido o aumento da resistência ao desgaste.

A Tabela 4.5 mostra uma comparação entre os valores de '*k*' de pinos e discos para as diferentes velocidades de deslizamento. Na velocidade de 0,1 m/s, a severidade do desgaste foi maior do que na velocidade de 0,9 m/s, tanto nos ensaios com discos forjados quanto com discos fundidos. Para os sistemas com discos fundidos, o coeficiente de desgaste dimensional para a velocidade de 0,1 m/s foi de 2 vezes a 3 vezes maior para os pinos e discos, comparando com a velocidade de 0,9 m/s. No caso dos sistemas com discos forjados, o desgaste de pinos e discos foi cerca de 4 vezes mais severo na velocidade de deslizamento de 0,1 m/s.

Tabela 4.5 – Comparação entre os valores obtidos para o coeficiente de desgaste dimensional '*k*' dos pinos e discos para as diferentes velocidades de deslizamento.

Material do disco	Velocidade	Comparativo entre '*k*' dos pinos (divisão pelo '*k*' do ensaio à velocidade de 0,9 m/s)	Comparativo entre '*k*' dos discos (divisão pelo '*k*' do ensaio à velocidade de 0,9 m/s)
Fundido	0,9 m/s	1	1
	0,1 m/s	2,2	2,6
Forjado	0,9 m/s	1	1
	0,1 m/s	3,7	3,9

Fonte: Autor

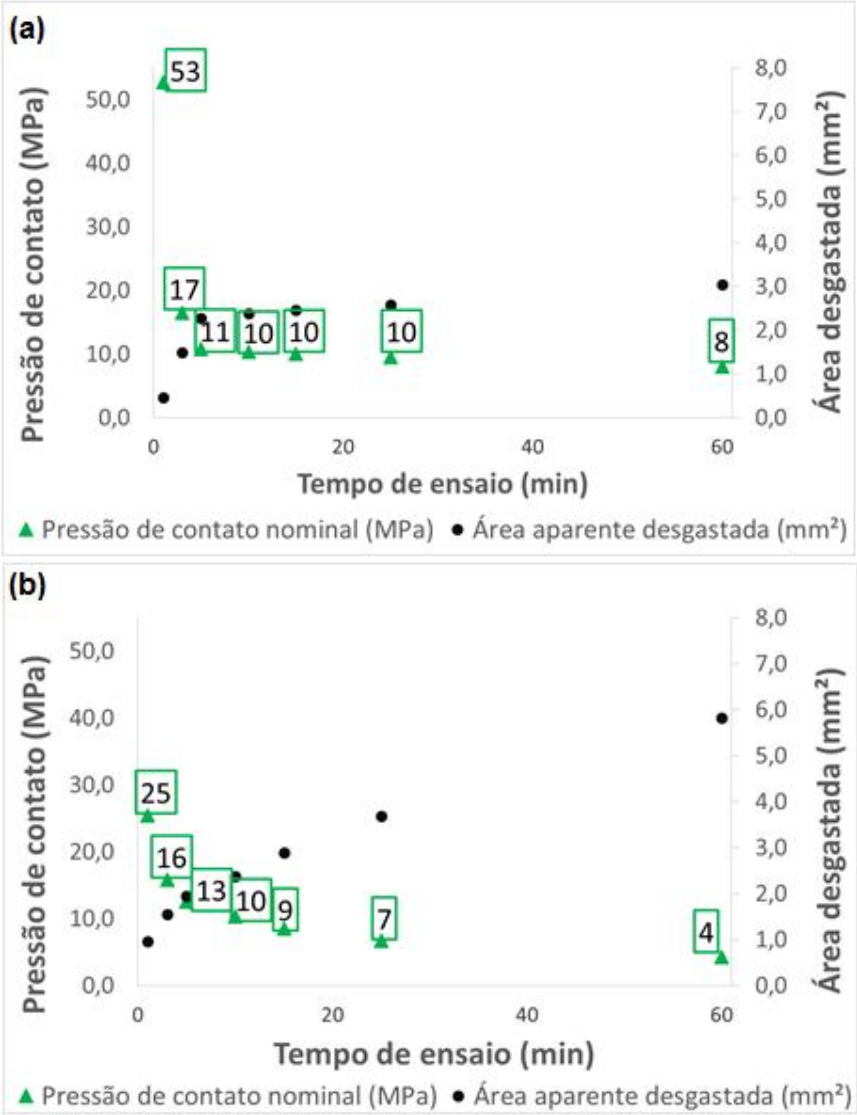
Uma hipótese inicial para a queda da severidade do desgaste em altas velocidades foi a diminuição nas pressões médias aparentes de contato, que seria mais rápida para velocidades de 0,9 m/s, visto que a pressão máxima nominal de 1,5 GPa é válida somente para o instante inicial. Com o início do desgaste do pino, a pressão nominal passa a ser calculada pela carga dividida pela área plana recém-formada de contato do pino com o disco.

A fim de avaliar a hipótese acima, foram realizados 4 ensaios nas diferentes condições de contato estudadas (discos fundidos e forjados, velocidades de 0,1 m/s e 0,9 m/s), com interrupções sempre nos mesmos intervalos de tempo, para medir a área desgastada dos pinos e, assim, obter valores corrigidos das pressões de contato e sua variação de acordo com o tempo de ensaio, em cada configuração. Importante frisar que tais ensaios foram utilizados somente para a análise citada, não podendo ser utilizados para calcular a severidade do desgaste, tampouco o coeficiente de atrito médio, pois o fato de ter havido interrupções altera consideravelmente as condições de contato dos ensaios contínuos.

Como o objetivo foi somente entender o comportamento do desgaste do pino e, consequentemente, da pressão de contato, não foram feitas mais repetições para as condições de contato preestabelecidas.

Como pode ser visto na Figura 4.16, o comportamento da pressão de contato em função do tempo é semelhante para as diferentes configurações de ensaios. Tanto para os ensaios com discos fundidos quanto com discos forjados, a partir de 3 minutos do início, os valores calculados da pressão de contato para as

diferentes velocidades de deslizamento (0,1 m/s e 0,9 m/s) foram muito próximos, o que invalida a hipótese apresentada. Portanto, a menor severidade no desgaste dos pinos e discos para a velocidade de 0,9 m/s não pode ser justificada por uma eventual diminuição mais acelerada das pressões de contato.



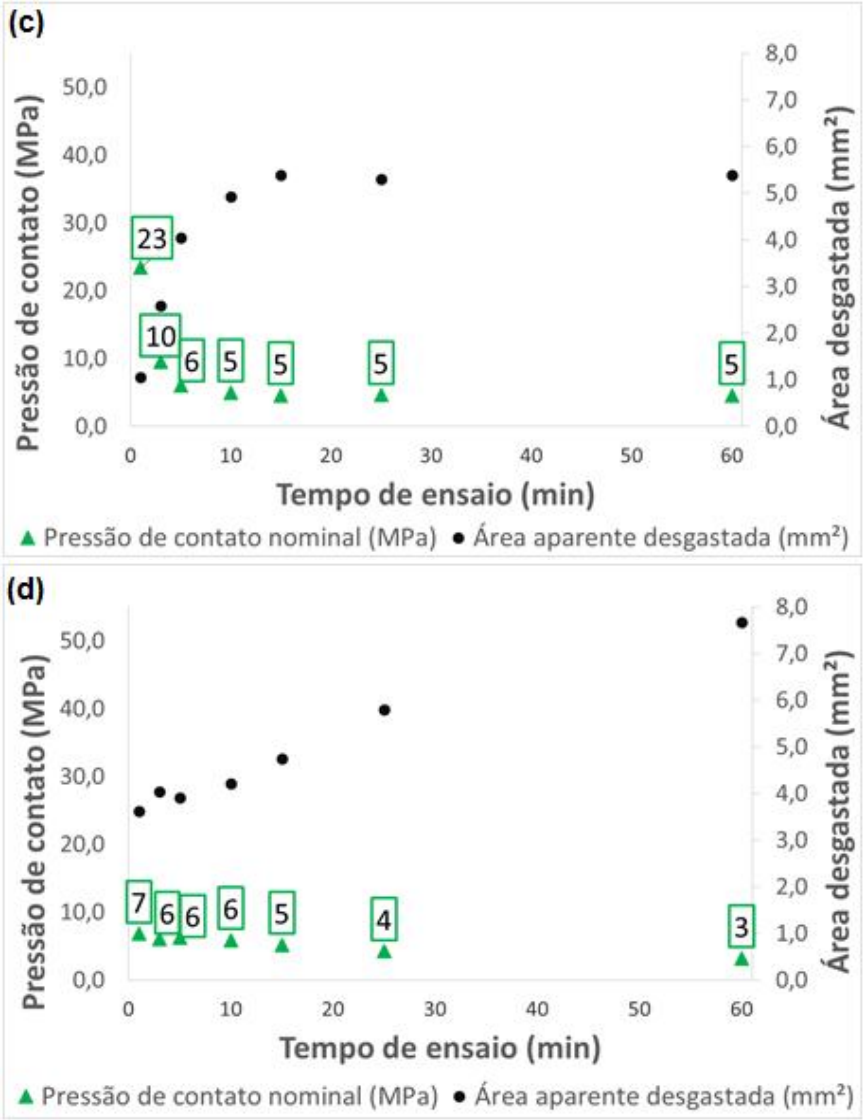


Figura 4.16 – Variação da pressão de contato *versus* tempo de ensaio para deslizamento de pino sobre (a) disco fundido à velocidade de 0,1 m/s; (b) disco fundido à velocidade de 0,9 m/s; (c) disco forjado à velocidade de 0,1 m/s; (d) disco forjado à velocidade de 0,9 m/s. Fonte: Autor.

Outra evidência de que a maior severidade do desgaste não teve relação com uma possível variação brusca das pressões de contato para a velocidade de 0,9 m/s é a comparação das áreas das calotas de desgaste dos pinos para distâncias de deslizamento próximas, conforme apresentado no gráfico da Figura 4.17.

Percebe-se que o desgaste do pino nos ensaios à velocidade de 0,1 m/s foi sempre maior para distâncias de deslizamento inferiores e próximas às dos ensaios à velocidade de 0,9 m/s. Como já mencionado anteriormente, os

resultados servem somente de comparação, não podendo ser utilizados para calcular a severidade do desgaste.

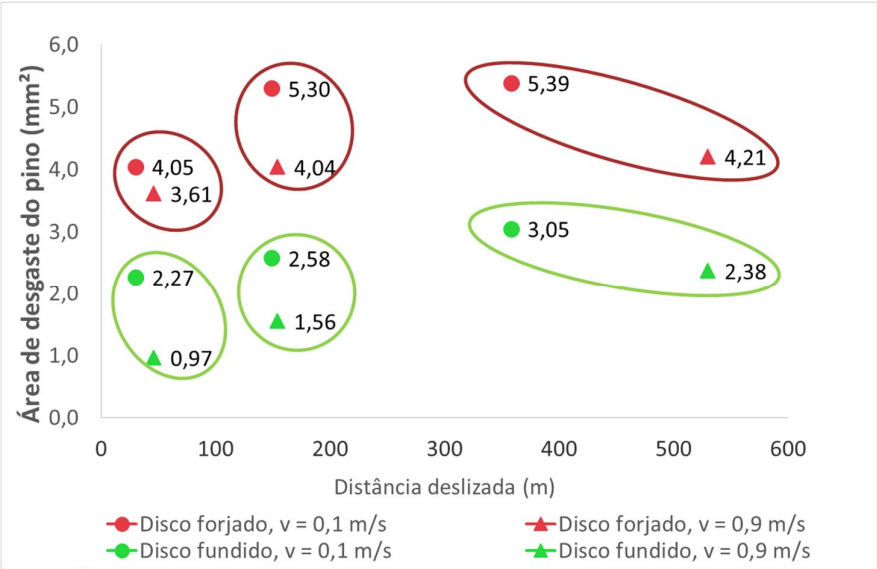


Figura 4.17 – Área aparente desgastada dos pinos de acordo com a distância deslizada – 30 m, 149 m e 358 m para ensaios à velocidade de 0,1 m/s (interrupções após 3, 25 e 60 minutos de ensaio) e 46 m, 154 m e 530 m para ensaios à velocidade de 0,9 m/s (interrupções após 1, 3 e 10 minutos de ensaio). Fonte: Autor.

A provável causa da menor severidade no desgaste de pinos e discos para os ensaios com velocidade de 0,9 m/s é a maior oxidação, favorecida pelo aumento de temperatura instantânea nas asperezas em contato a esta velocidade. Resultado semelhante havia sido observado por Olofsson e Telliskivi (2003) em ensaios pino-disco com materiais de trilhos e rodas similares aos utilizados nessa pesquisa e pressão de contato nominal máxima de 0,8 GPa, como pode ser visto na Figura 2.43 e na Tabela 2.6. A diferença fundamental foi que na pesquisa de Olofsson e Telliskivi (2003) o coeficiente de atrito diminuiu junto com o coeficiente de desgaste adimensional, sugerindo a presença de um regime de desgaste oxidativo dominante.

Nos ensaios aqui realizados, μ foi maior para velocidades de 0,9 m/s, indicando que a oxidação não ocorreu de forma dominante. Possivelmente, houve uma competição entre os diferentes mecanismos de desgaste: regime oxidativo, devido à maior taxa de oxidação do aço nas altas temperaturas da interface e mecanismos plásticos de adesão, devido à redução da resistência mecânica a estas temperaturas.

A Figura 4.18 apresenta os resultados do coeficiente de desgaste dimensional em função do coeficiente de atrito médio para cada condição de ensaio.

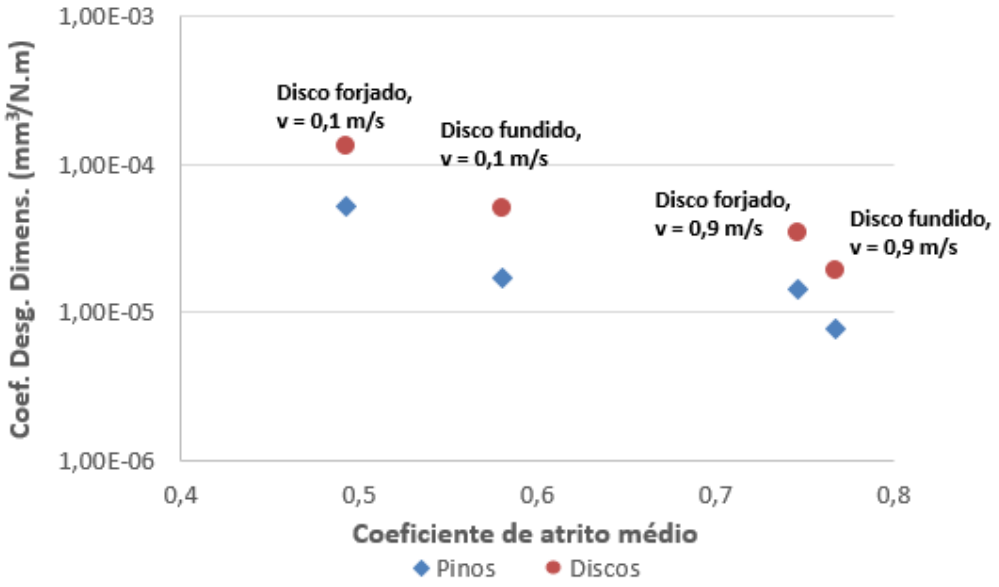


Figura 4.18 – Coeficiente de desgaste dimensional (mm³/N.m) em função do coeficiente de atrito médio para os ensaios realizados com discos fundidos e forjados a velocidades de 0,1 m/s e 0,9 m/s. Fonte: Autor.

Fica evidente o caráter sistêmico do atrito e do desgaste, já que não existe relação direta entre estas quantidades. De acordo com Blau (2009), a relação entre atrito e desgaste depende da dissipação de energia, e a partilha de energia é dependente de atributos específicos de cada tribossistema, podendo haver ou não proporcionalidade entre coeficiente de atrito e desgaste. No caso específico deste trabalho, os sistemas com maior resistência ao desgaste dos pinos e discos apresentaram uma tendência para maiores valores de atrito.

4.2.3. Mecanismos de desgaste

4.2.3.1. Discos

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam as micrografias das trilhas de desgaste dos discos fundidos e forjados, para os ensaios realizados a velocidades de deslizamento de 0,1 m/s e 0,9 m/s.

Nos discos fundidos ensaiados à velocidade de 0,1 m/s, o volume desgastado foi tão baixo que a trilha de desgaste se confunde com as marcas de usinagem.

Para facilitar a visualização, os limites da trilha foram destacados na imagem. A micrografia sugere a presença majoritária de sulcos plásticos, com a presença de material aderido na superfície desgastada. Para os discos forjados, considerando a mesma velocidade, as micrografias ópticas sugerem maior ocorrência de mecanismos plásticos de adesão. Nota-se, também, uma maior largura da trilha.

Para a velocidade de 0,9 m/s, as mesmas características foram observadas: mecanismos de natureza plástica dominantes, com ocorrência de sulcos plásticos e de adesão, que por sua vez foi mais acentuada novamente no disco forjado do que no fundido. As larguras das trilhas de desgaste foram maiores para os ensaios à velocidade de deslizamento de 0,9 m/s, o que pode ser justificado pelo maior volume desgastado do pino e, por consequência, maior área de contato do mesmo com os discos, já que os pinos possuíam a extremidade esférica.

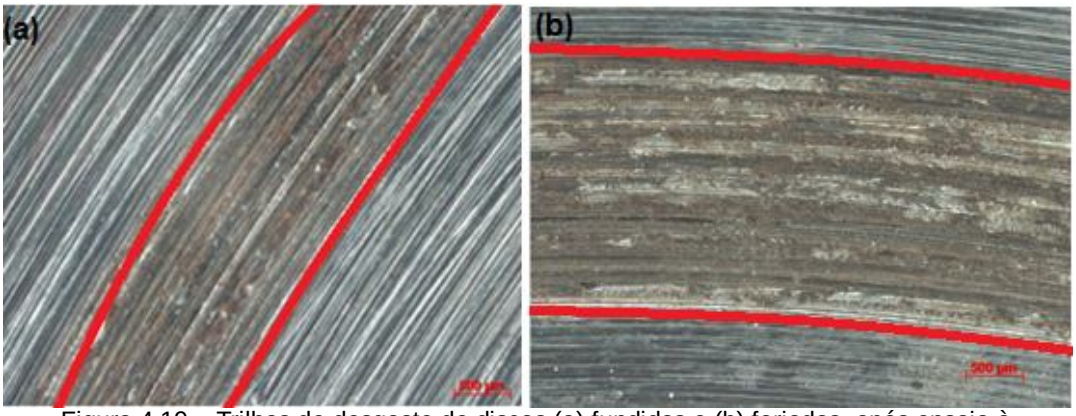


Figura 4.19 – Trilhas de desgaste de discos (a) fundidos e (b) forjados, após ensaio à velocidade de 0,1 m/s. Observação no microscópio estereoscópico. Fonte: Autor.

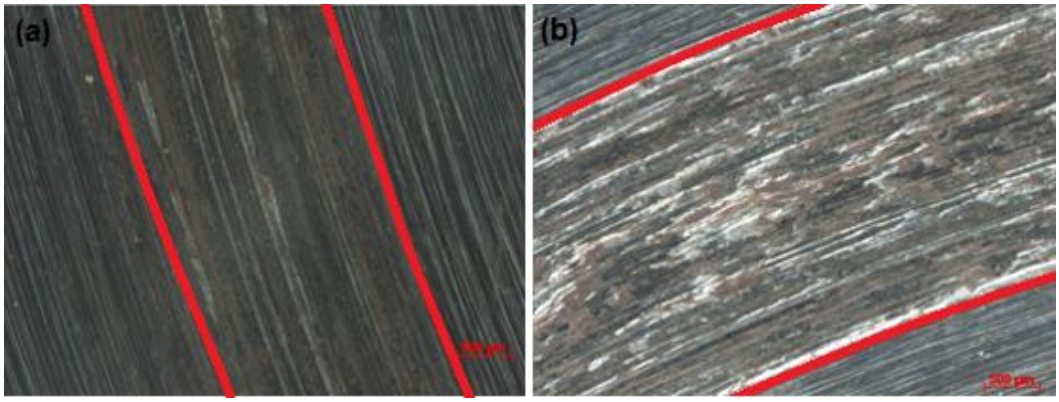


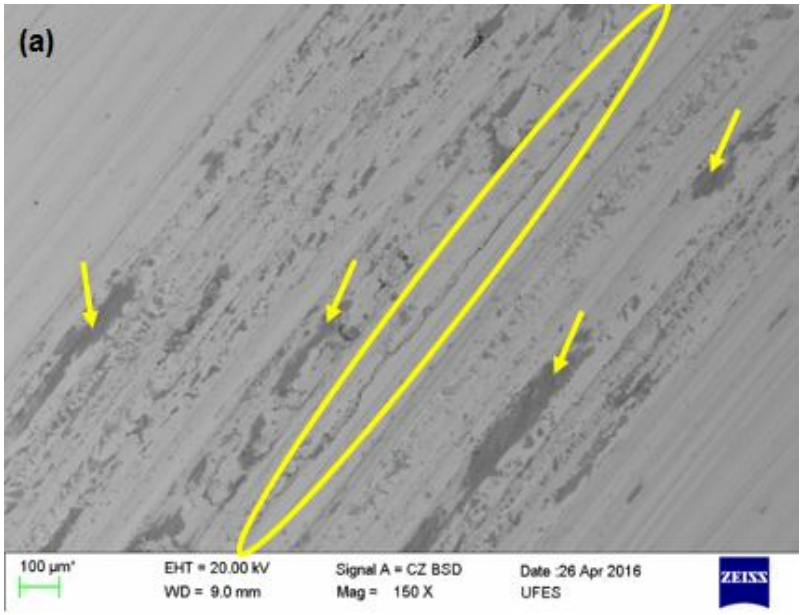
Figura 4.20 – Trilhas de desgaste de discos (a) fundidos e (b) forjados, após ensaio à velocidade de 0,9 m/s. Observação no microscópio estereoscópico. Fonte: Autor.

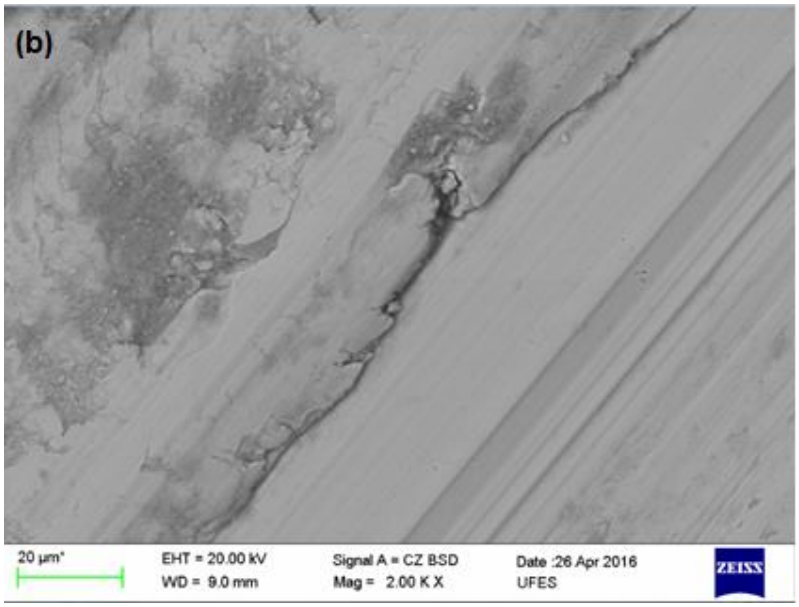
Maiores detalhes das trilhas de desgaste são apresentados nas Figuras 4.21 a 4.24, obtidas através do MEV.

Essas imagens ratificam a informação de que os mecanismos de desgaste foram de natureza plástica, com sulcos plásticos e ocorrência de adesão de material, geralmente oxidado, nas superfícies de contato. Percebem-se os sulcos nas trilhas de desgaste com evidências de material deslocado para as bordas destes sulcos. Em seguida, o material acumulado é destacado da trilha devido à deformação plástica repetida. Resultados similares foram obtidos por Falqueto (2015).

São observados em detalhe também as regiões com material aderido à superfície. As partículas removidas são altamente deformadas e têm alta superfície específica, o que favorece sua rápida oxidação, evidenciada pela ocorrência de trincas no material (mais frágil) e sua coloração mais escura. Esta partícula oxidada adere à superfície do disco, podendo causar eventos microabrasivos.

O mecanismo observado é explicado por Jiang *et al* (1995 e 1998) e Stott (2002): boa parte dos *debris* gerados se mantém na interface, ficando sujeitos ao destacamento e cominuição. Parte destas partículas acaba se aglomerando e aderindo às superfícies de desgaste, principalmente em sulcos ou riscos formados durante o deslizamento. Com a continuação do ensaio, as partículas seguem sofrendo deformação e compactação e podem ser removidas da superfície desgastada, atuando como partículas de terceiro corpo, ou se manter em camadas aderidas às superfícies.


(a)
100 µm*
EHT = 20.00 kV
WD = 9.0 mm
Signal A = CZ BSD
Mag = 150 X
Date :26 Apr 2016
UFES
ZEISS


(b)
20 µm*
EHT = 20.00 kV
WD = 9.0 mm
Signal A = CZ BSD
Mag = 2.00 K X
Date :26 Apr 2016
UFES
ZEISS

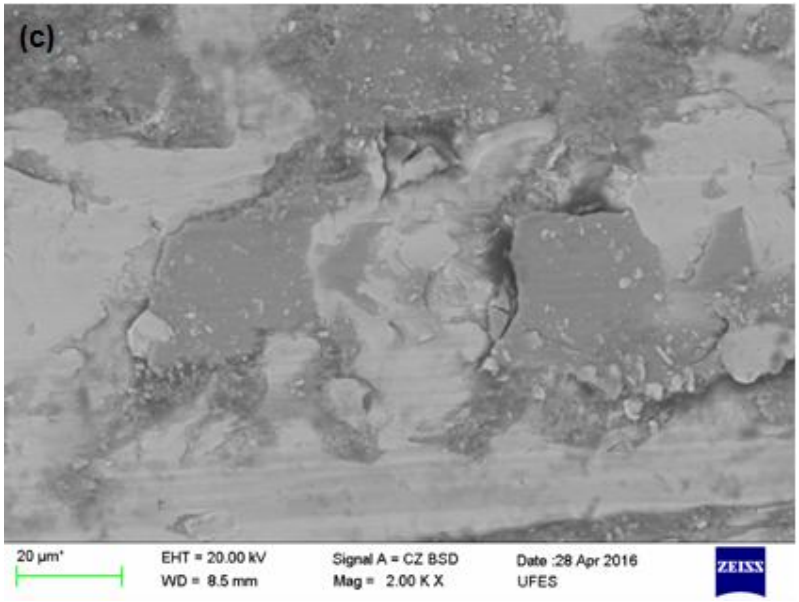
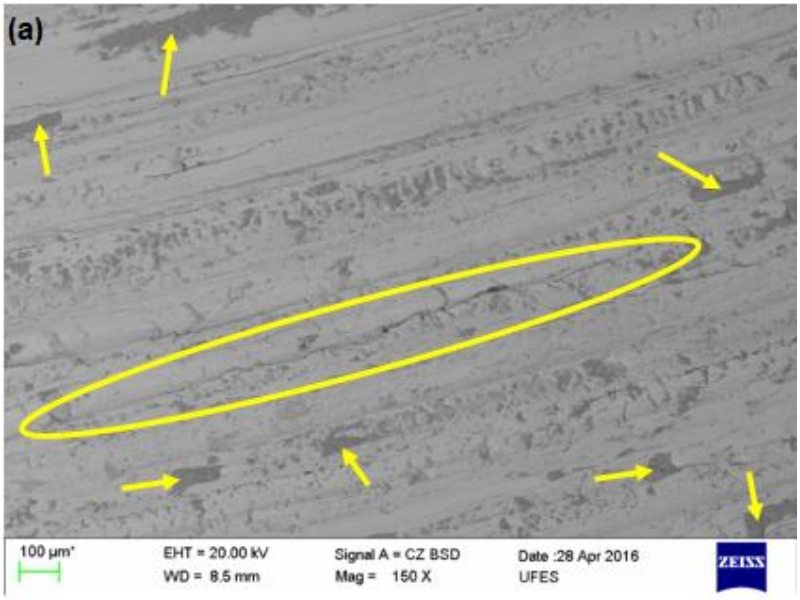


Figura 4.21 – Observação no MEV dos mecanismos de desgaste de discos fundidos após ensaio à velocidade de 0,1 m/s – (a) Trilha de desgaste com destaque para o material deslocado para a borda do sulco plástico (elipse) e para regiões com material oxidado aderido (setas); (b) detalhe da região da borda do sulco; (c) detalhe da região com *debris* oxidado aderido à superfície. Fonte: Autor.



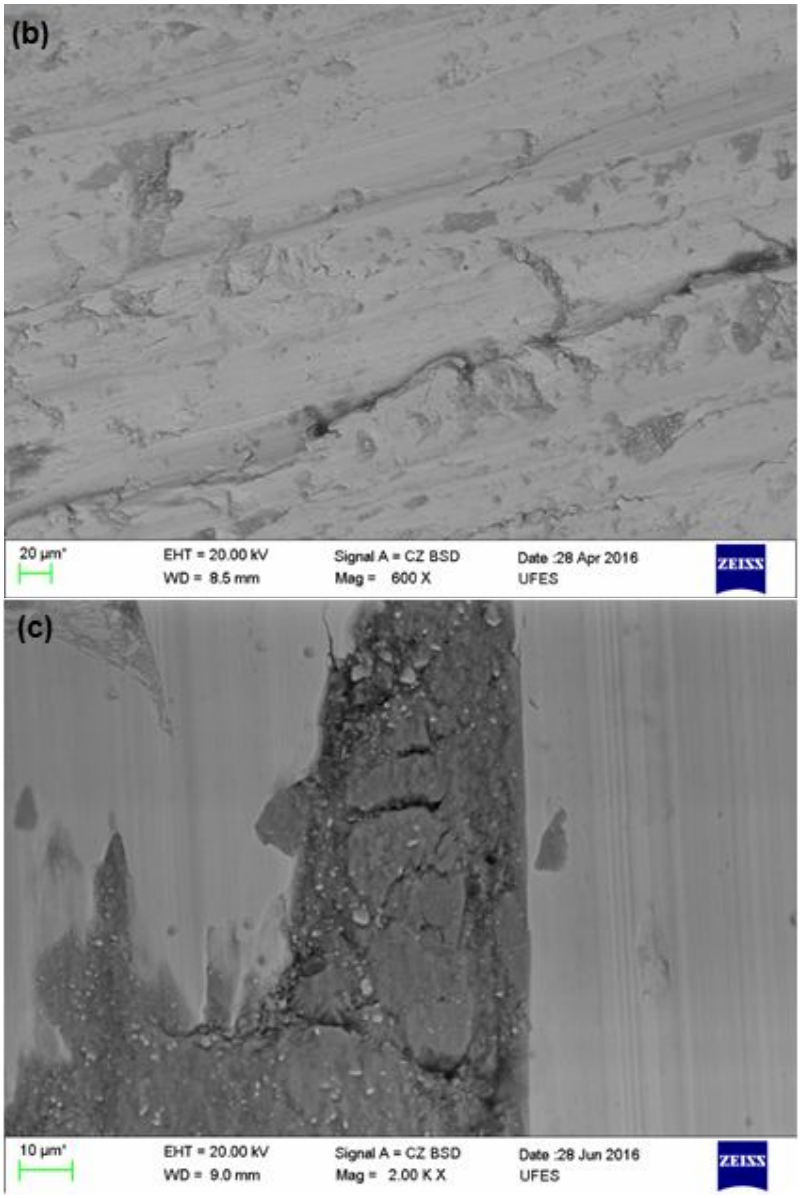
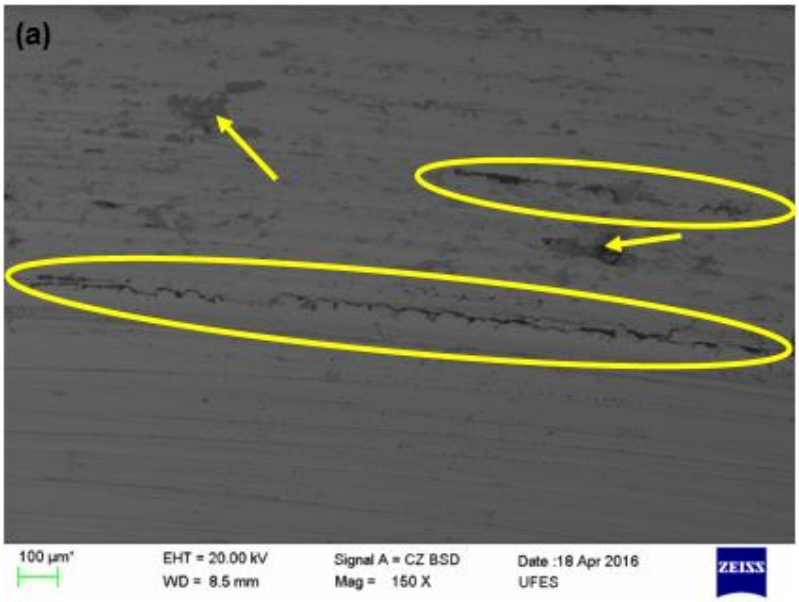
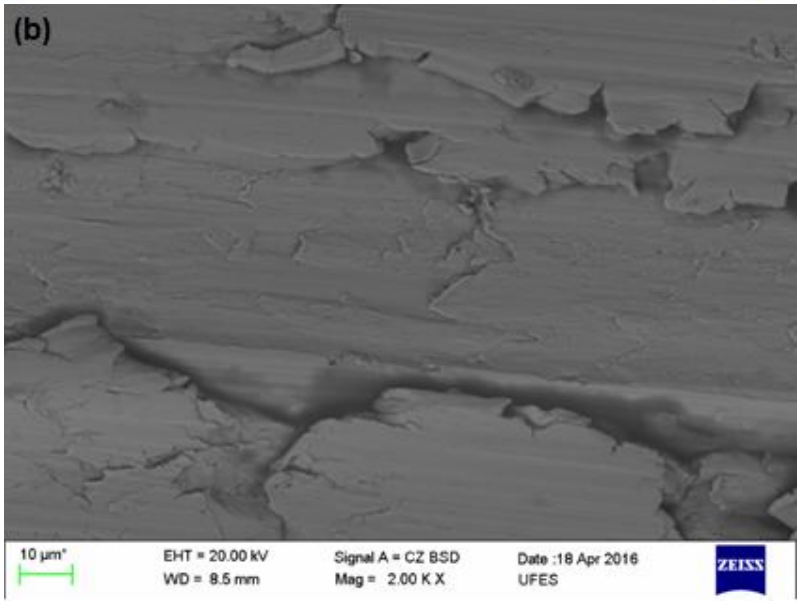


Figura 4.22 – Observação no MEV dos mecanismos de desgaste de discos de forjados após ensaio à velocidade de 0,1 m/s – (a) Trilha de desgaste com destaque para o material deslocado para a borda do sulco plástico (elipse) e para regiões com material oxidado aderido (setas); (b) detalhe da região da borda do sulco; (c) detalhe da região com *debris* oxidado aderido à superfície. Fonte: Autor.


(a)
100 µm*
EHT = 20.00 kV
WD = 8.5 mm
Signal A = CZ BSD
Mag = 150 X
Date :18 Apr 2016
UFES
ZEISS


(b)
10 µm*
EHT = 20.00 kV
WD = 8.5 mm
Signal A = CZ BSD
Mag = 2.00 K X
Date :18 Apr 2016
UFES
ZEISS

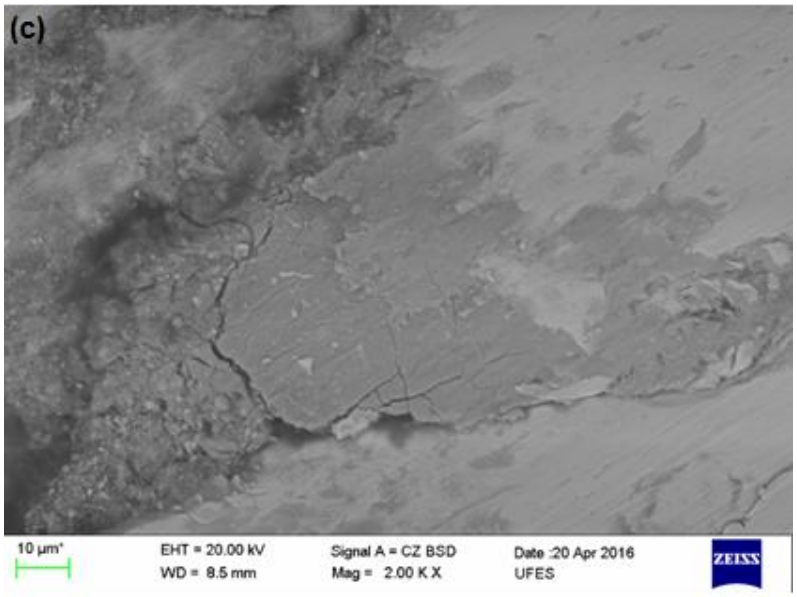
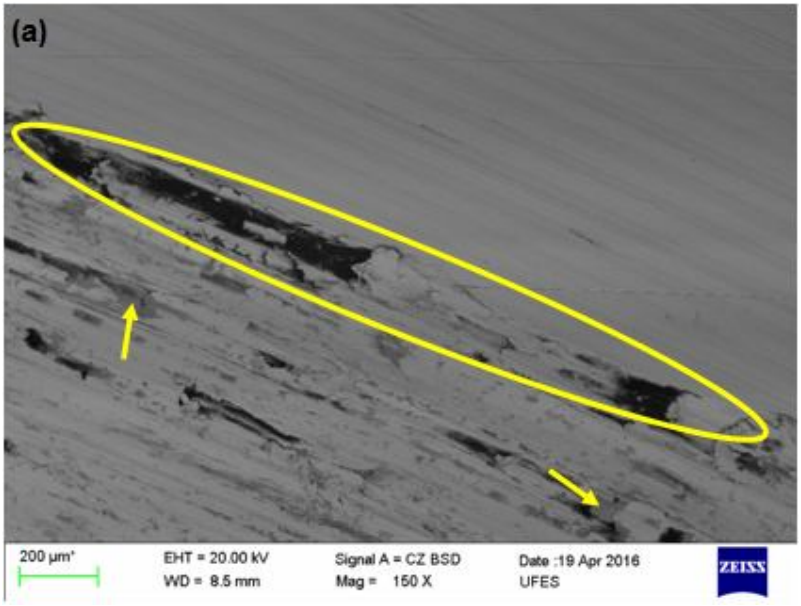


Figura 4.23 – Observação no MEV dos mecanismos de desgaste de discos fundidos após ensaio à velocidade de 0,9 m/s – (a) Trilha de desgaste com destaque para o material deslocado para a borda do sulco plástico (elipse) e para regiões com material oxidado aderido (setas); (b) detalhe da região da borda do sulco; (c) detalhe da região com *debris* oxidado aderido à superfície. Fonte: Autor.



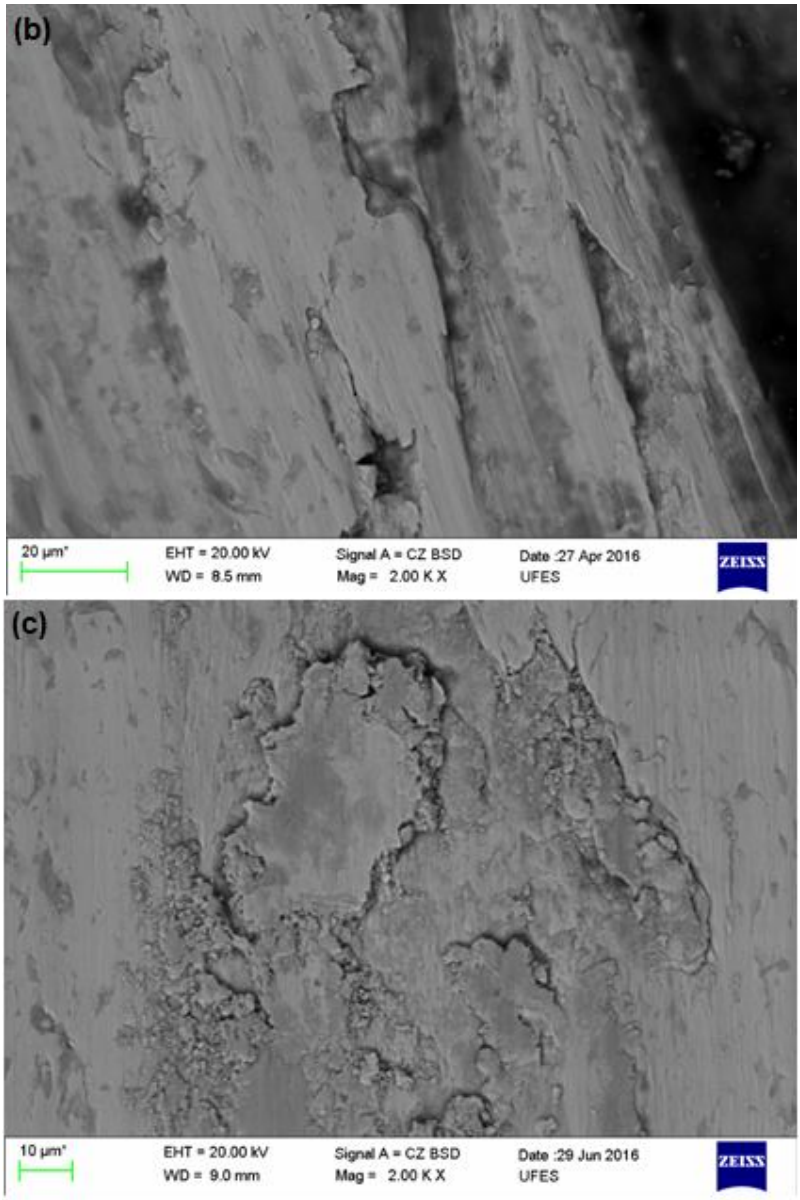


Figura 4.24 – Observação no MEV dos mecanismos de desgaste de discos forjados após ensaio à velocidade de 0,9 m/s – (a) Trilha de desgaste com destaque para o material deslocado para a borda do sulco plástico (elipse) e para regiões com material oxidado aderido (setas); (b) detalhe da região da borda do sulco; (c) detalhe da região com *debris* oxidado aderido à superfície. Fonte: Autor.

4.2.3.2.Pinos

As Figuras 4.25 a 4.28 apresentam as micrografias ópticas dos pinos, obtidas através do microscópio estereoscópico, para os ensaios realizados contra discos fundidos e forjados e velocidades de deslizamento de 0,1 m/s e 0,9 m/s.

Em todos os ensaios os pinos apresentaram sulcos plásticos, assim como havia sido observado por Danks e Clayton (1987) em seus ensaios com pino-disco. A

diferença fundamental é que para a velocidade de 0,1 m/s, tanto nos ensaios com discos fundidos quanto forjados, houve maior incidência de adesão de material nos pinos – indicadas pelas setas amarelas – do que nos ensaios à velocidade de 0,9 m/s. Aparentemente, o material metálico aderido sofreu oxidação posterior com a continuidade dos ensaios. Resultado semelhante ao observado por Viáfara *et al* (2005) nos ensaios com pinos perlíticos de aço AISI 1070 contra discos também perlíticos fabricados de aço AISI 1085, com velocidade de 1 m/s e carga de 30 N, mostrado na Figura 2.42(b).

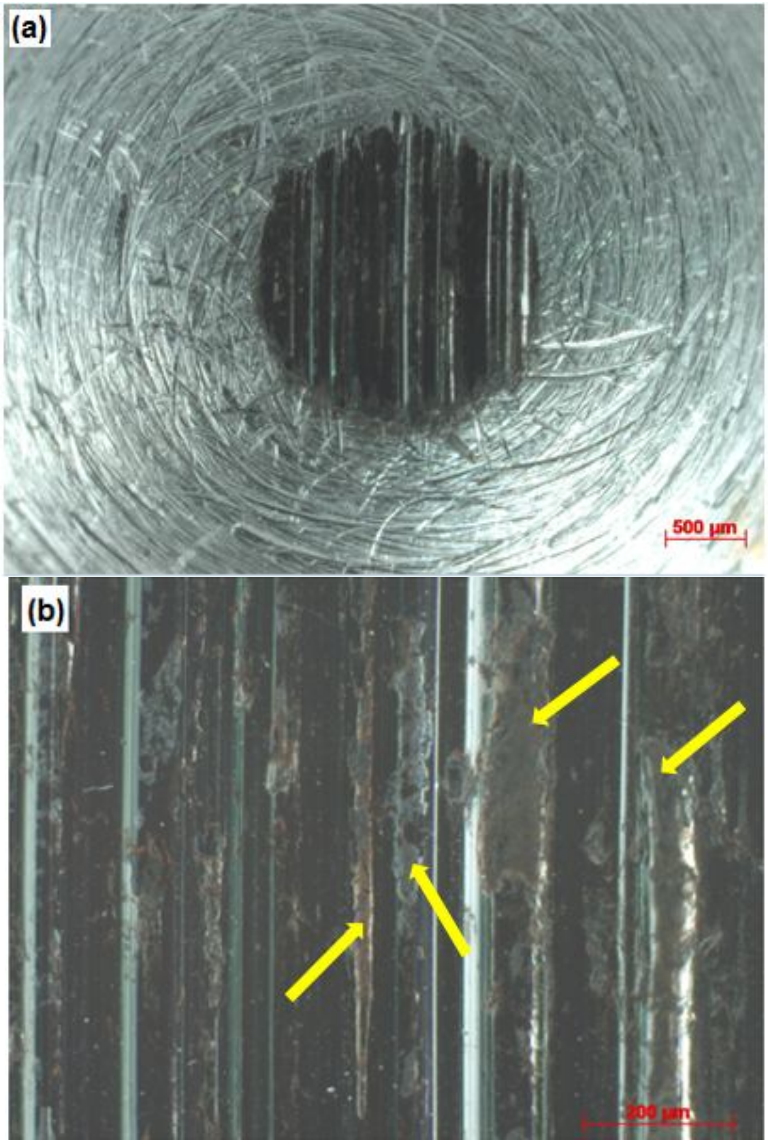


Figura 4.25 – (a) Superfície desgastada de pino ensaiado contra disco fundido, à velocidade de 0,1 m/s, observada em microscópio estereoscópico; (b) Material aderido no pino. Fonte: Autor.

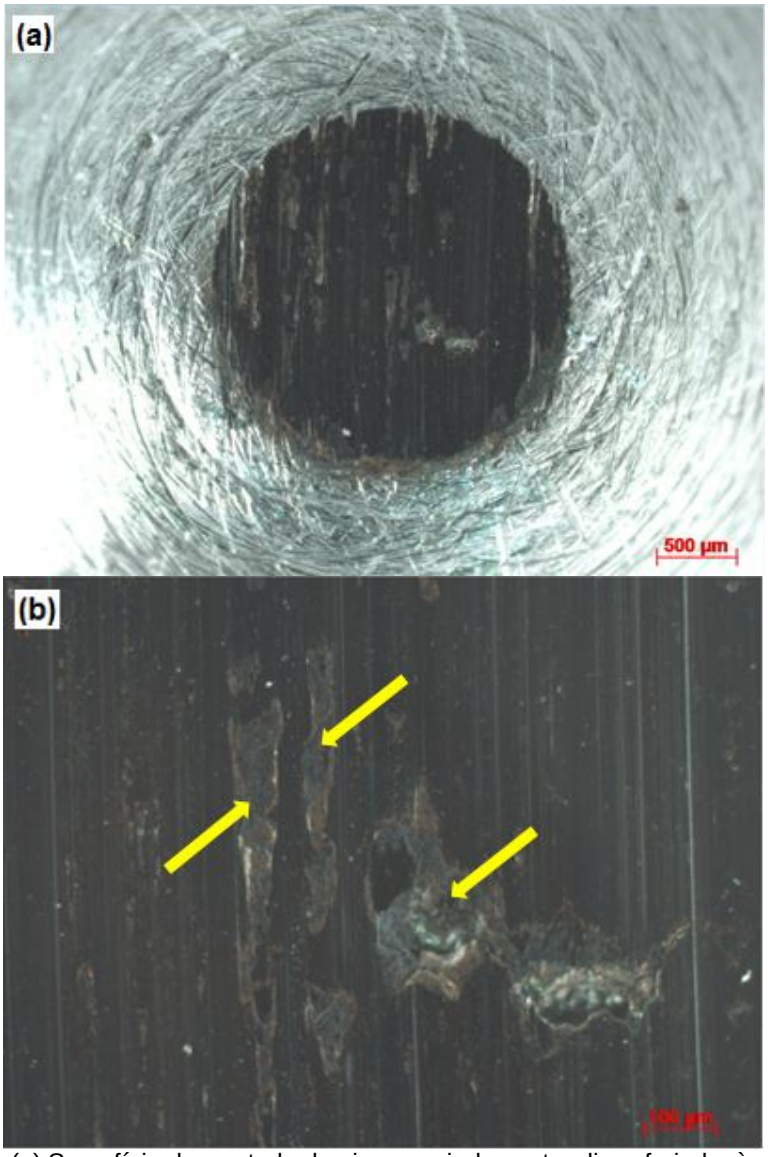


Figura 4.26 – (a) Superfície desgastada de pino ensaiado contra disco forjado, à velocidade de 0,1 m/s, observada em microscópio estereoscópico; (b) Material aderido no pino. Fonte: Autor.

Figura 4.27 – Superfície desgastada de pino ensaiado contra disco fundido, à velocidade de 0,9 m/s, observada em microscópio estereoscópico. Fonte: Autor.

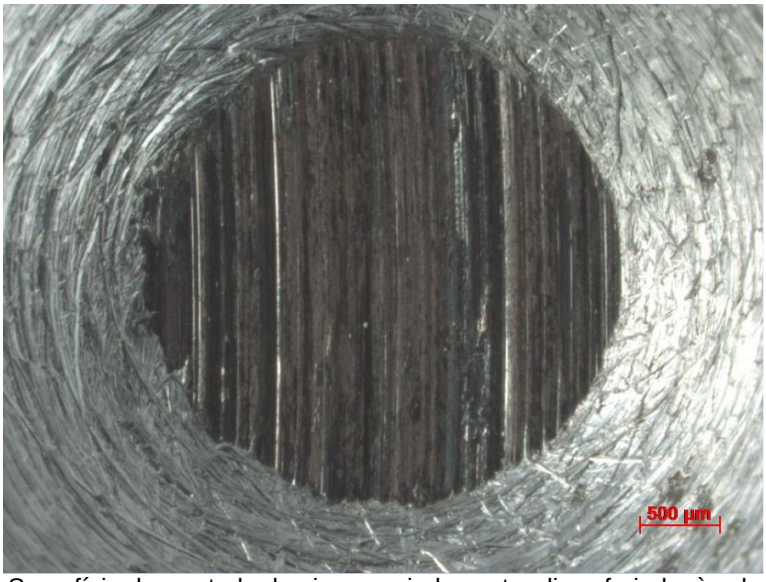


Figura 4.28 – Superfície desgastada de pino ensaiado contra disco forjado, à velocidade de 0,9 m/s, observada em microscópio estereoscópico. Fonte: Autor.

As Figuras 4.29 e 4.30, obtidas através de análise no MEV, ilustram bem a diferença da quantidade de material aderido nos pinos, identificados pelas áreas mais escuras, de acordo com a velocidade de deslizamento do ensaio, confirmando o que foi observado no microscópio estereoscópico. Percebem-se materiais mais espessos, compridos e em maior quantidade nos pinos ensaiados à velocidade de 0,1 m/s, o que sugere que a maior severidade no desgaste ocorrida para esta velocidade se deu realmente por um mecanismo mais agressivo de adesão.

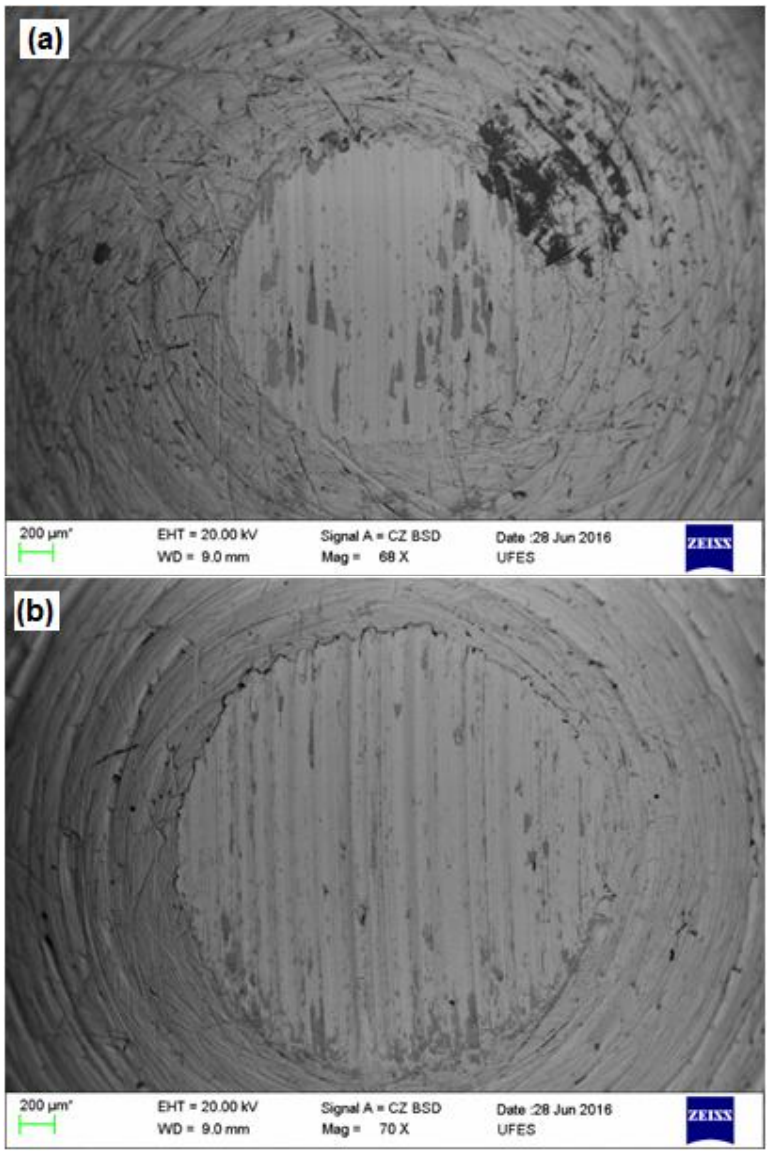


Figura 4.29 – Superfícies desgastadas de pinos ensaiados contra discos fundidos, às velocidades de (a) 0,1 m/s e (b) 0,9 m/s. Observação no MEV. Fonte: Autor.

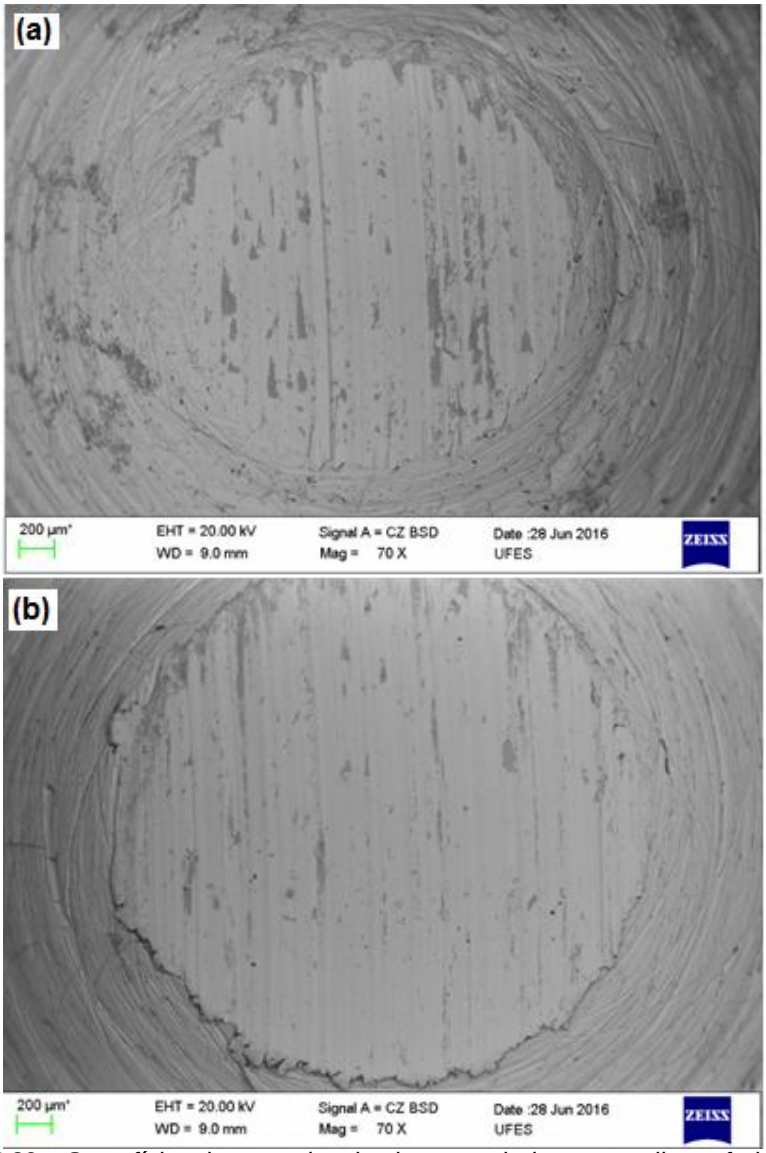


Figura 4.30 – Superfícies desgastadas de pinos ensaiados contra discos forjados, às velocidades de (a) 0,1 m/s e (b) 0,9 m/s. Observação no MEV. Fonte: Autor.

Detalhes das regiões com adesão de material identificadas no MEV, para as diferentes condições de ensaios, são apresentadas a seguir. É possível confirmar os resultados conseguidos na análise pelo microscópio estereoscópico. Observa-se também no MEV o mesmo fenômeno também identificado nos discos: desgaste dominado por mecanismos de natureza plástica, com transferência metálica entre disco e pino, seguida de oxidação dos *debris*, evidenciada pela presença de trincas e coloração mais escura do que a do aço.

As Figuras 4.31 e 4.32 ilustram a morfologia típica do material depositado na superfície dos pinos, respectivamente para os ensaios à velocidade de 0,1 m/s

e de 0,9 m/s. Percebem-se que as características são semelhantes. Na Figura 4.31(b), referente ao pino ensaiado contra o disco forjado à velocidade de 0,9 m/s, nota-se a presença de uma partícula de desgaste oxidada junto de uma plaqueta metálica se formando e prestes a ser removida da superfície.

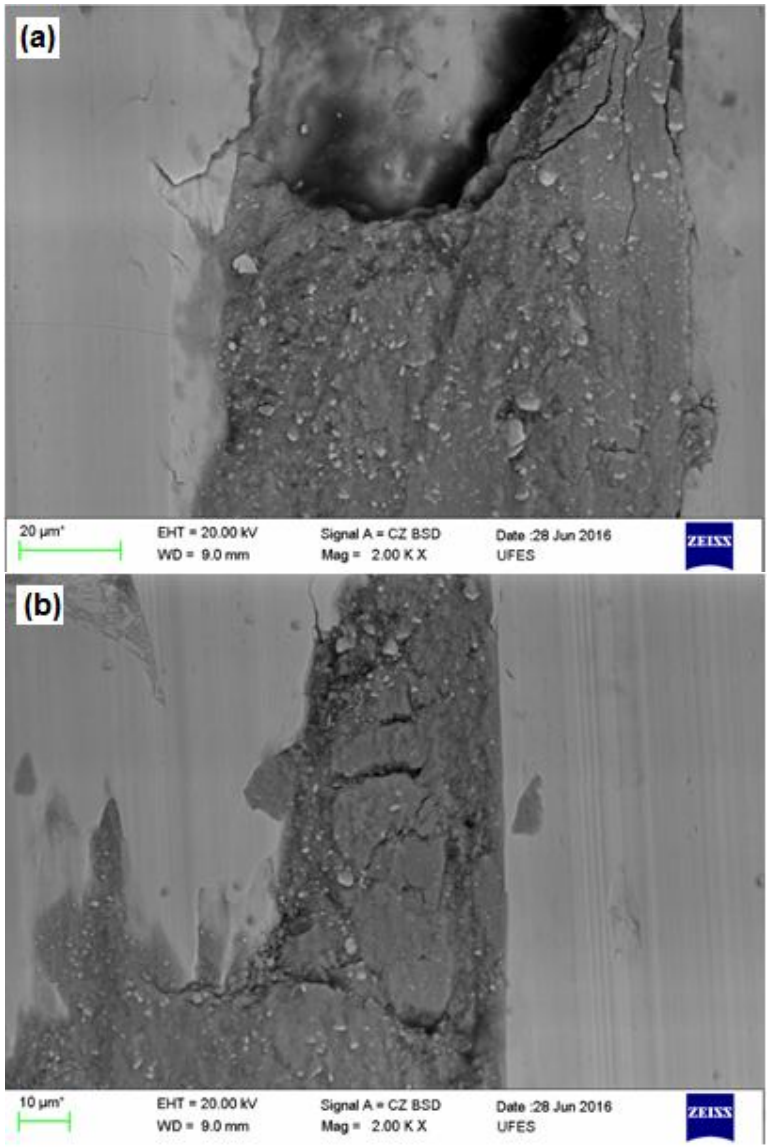


Figura 4.31 – Detalhe dos materiais aderidos aos pinos ensaiados contra discos (a) fundido e (b) forjado, à velocidade de 0,1 m/s. Observação no MEV. Fonte: Autor.

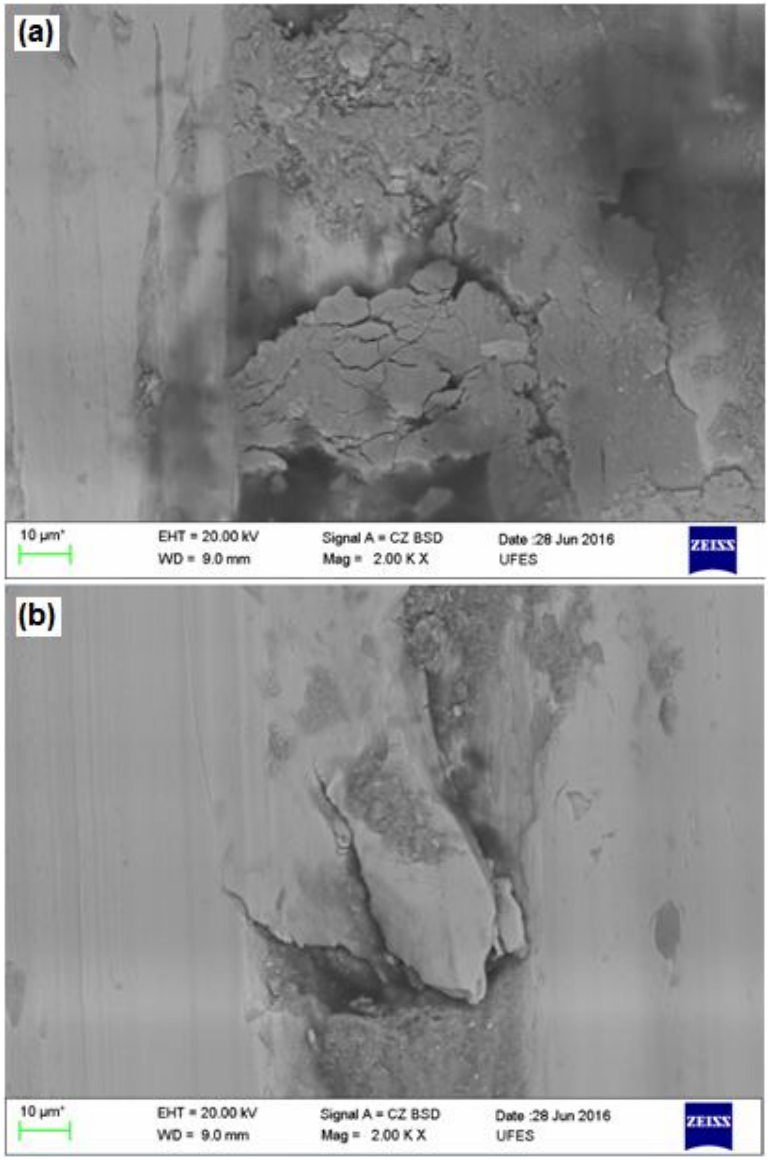


Figura 4.32 – Detalhe dos materiais aderidos aos pinos ensaiados contra discos (a) fundido e (b) forjado, à velocidade de 0,9 m/s. Observação no MEV. Fonte: Autor.

As marcas de adesão verificadas para as 4 diferentes condições de ensaios, tanto nos pinos quanto nos discos, são semelhantes àquelas observadas por Viáfara *et al* (2005), mostradas nas Figuras 2.49(a) e 2.51(a).

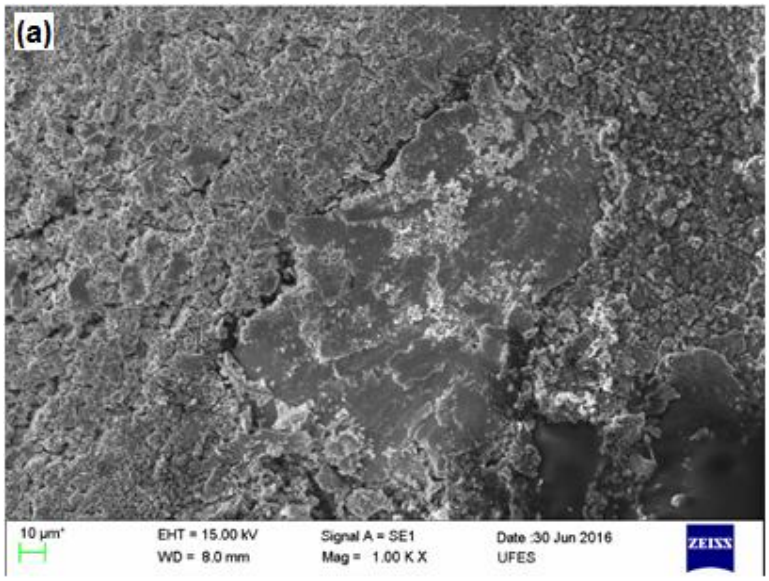
A morfologia do material aderido às superfícies dos discos e pinos é similar à que foi encontrada por Zhu *et al* (2015), exibida nas Figuras 2.53(b) e 2.53(c), o que é mais uma evidência de que de fato sofreram oxidação após aderirem à superfície oposta.

4.2.3.3. Debris

As Figuras 4.33 a 4.36 apresentam as imagens detalhadas dos *debris*, gerados nos ensaios realizados contra discos de fundidos e forjados, em velocidades de deslizamento de 0,1 m/s e 0,9 m/s.

Para todas as configurações dos ensaios, foram obtidos *debris* de tamanhos variados. Foram identificadas plaquetas grandes, de comprimentos entre 100 e 250 µm e com superfícies rugosas, assim como *debris* muito pequenos, com dimensões menores do que 5 µm e formato irregular. A exceção fica para os ensaios com disco fundido, à velocidade de 0,9 m/s, cujos *debris* identificados no MEV não chegaram a dimensões maiores do que 50 µm. De qualquer forma, houve também relativa variação no tamanho e grande quantidade de *debris* muito pequenos e com formato irregular.

Nos ensaios com discos forjados, tanto com velocidade de deslizamento de 0,1 m/s quanto de 0,9 m/s, foi possível identificar também partículas maiores formadas por vários *debris* aglomerados, formando plaquetas de maiores dimensões, possivelmente pelo fato de ter havido maior desgaste nestes discos, consequentemente maior formação de *debris*. O fato de terem sido formadas partículas a partir destes *debris* acumulados indica que os mesmos permaneceram na interface durante os ensaios. Para os discos fundidos, este fenômeno não foi percebido nas análises no MEV.



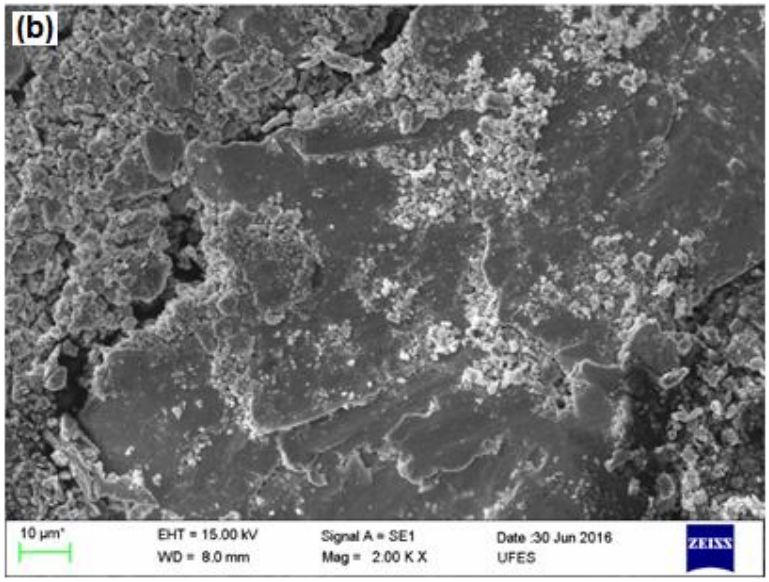
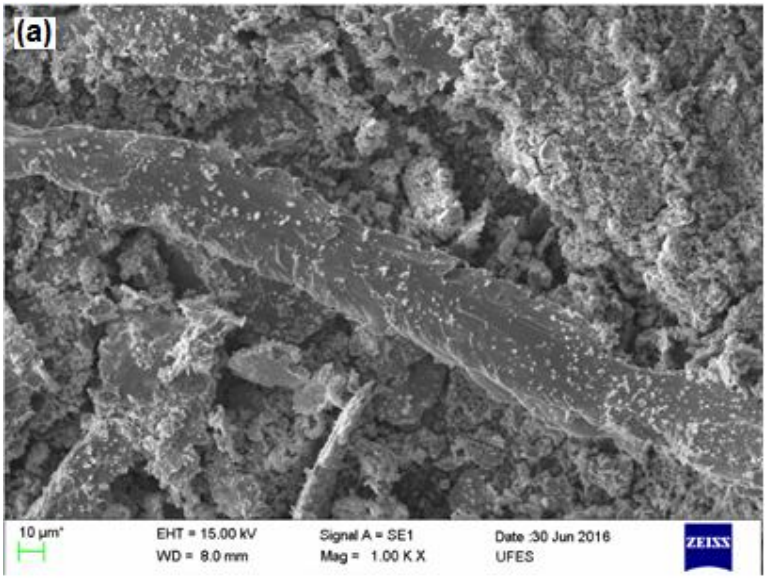


Figura 4.33 – Observação no MEV dos *debris* coletados após ensaio com disco fundido, à velocidade de 0,1 m/s – (a) Plaqueta de aproximadamente 150 µm de comprimento entre partículas irregulares menores que 5 µm; (b) Detalhe da rugosidade da plaqueta. Fonte: Autor.



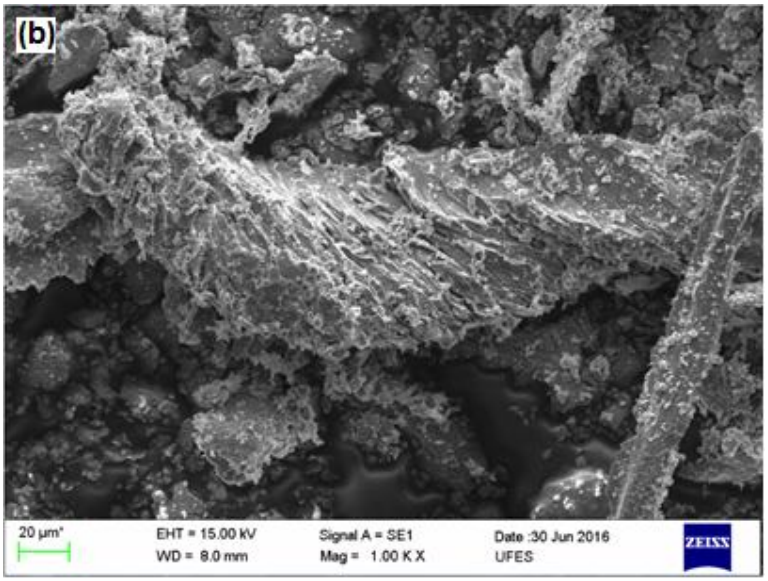
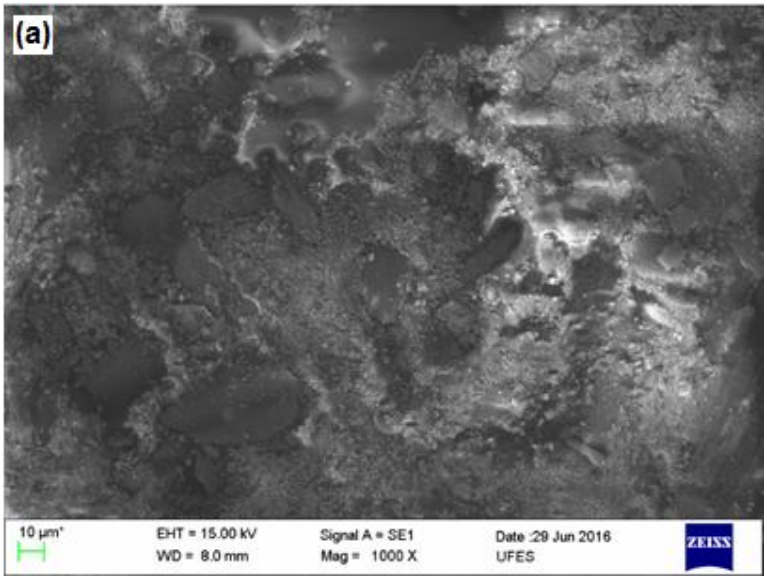


Figura 4.34 – Observação no MEV dos *debris* coletados após ensaio com disco forjado, à velocidade de 0,1 m/s – (a) Plaqueta de aproximadamente 250 µm de comprimento entre partículas irregulares menores que 5 µm; (b) *Debris* acumulados, formando plaqueta de aproximadamente 230 µm de comprimento. Fonte: Autor.



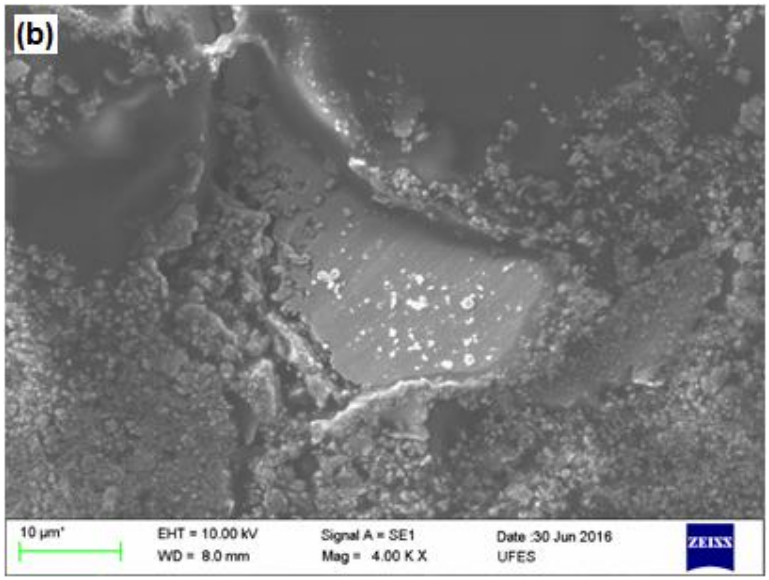
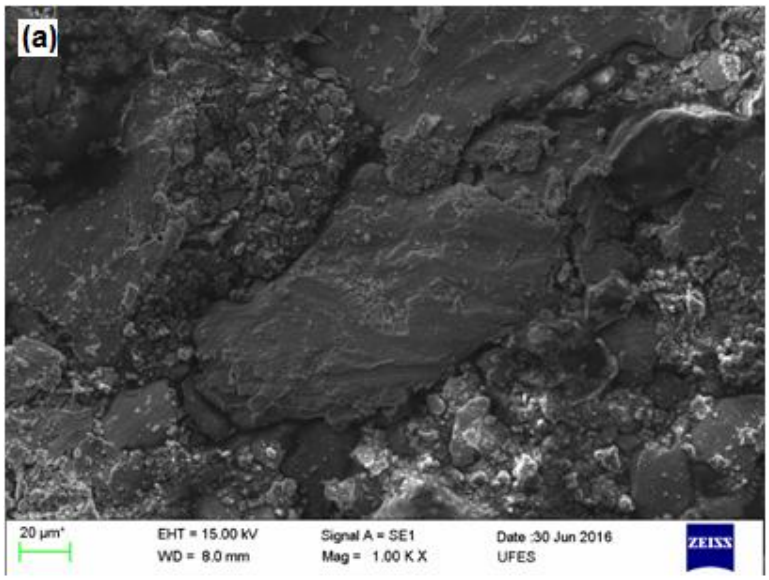


Figura 4.35 – Observação no MEV dos *debris* coletados após ensaio com disco fundido, à velocidade de 0,9 m/s – (a) Plaquetas de aproximadamente 50 µm de comprimento entre partículas irregulares menores que 5 µm; (b) Detalhe da rugosidade da plaqueta. Fonte: Autor.



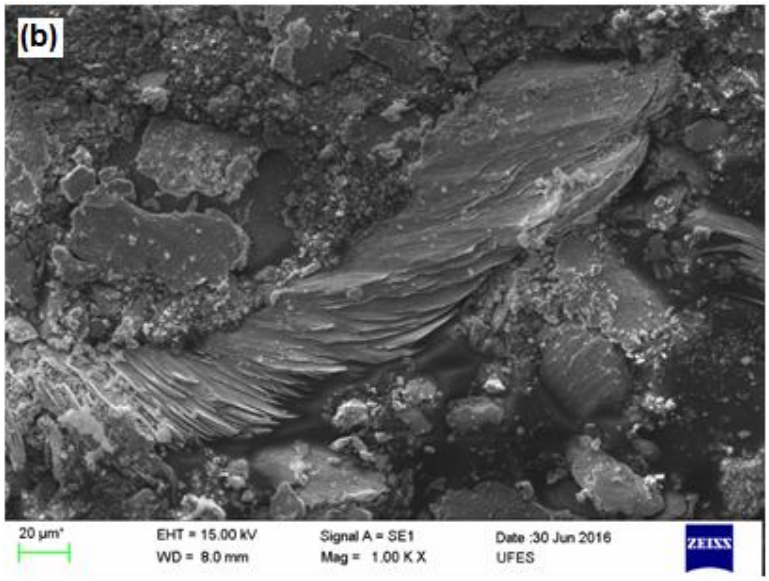


Figura 4.36 – Observação no MEV dos *debris* coletados após ensaio com disco forjado, à velocidade de 0,9 m/s – (a) Plaqueta de aproximadamente 140 µm de comprimento entre partículas irregulares menores que 5 µm; (b) *Debris* acumulados, formando plaqueta de aproximadamente 230 µm de comprimento. Fonte: Autor.

Os resultados obtidos foram similares aos apresentados por Bolton e Clayton (1984) para os regimes II e III (severo e catastrófico), sendo mais uma evidência que estes regimes de desgaste imperam nos ensaios realizados nas condições de contato típicas do ataque do friso da roda ao canto de bitola do trilho. Como pode ser visto nas Figuras 2.22(b) e 2.23(b), Bolton e Clayton (1984) também detectaram, nos regimes severo e catastrófico, *debris* de tamanho muito variados e com a superfície muito rugosa, assim como foi observado neste trabalho.

A partir da análise dos *debris*, sugere-se que o regime de desgaste existente nos pinos e discos ensaiados neste trabalho está entre o severo e o catastrófico, possivelmente na transição. A característica similar das partículas desgastadas para as 4 condições de ensaio, aliada aos resultados de desgaste relativamente próximos – coeficientes dimensionais de desgaste '*k*' na mesma ordem de grandeza – indicam que em todos os ensaios o regime foi o mesmo.

Ao analisar os mapas de desgaste gerados por Lewis e Olofsson (2004), pode-se dizer que os resultados apresentados neste trabalho são similares. As Figuras 2.54, 2.55 e 2.56 exibem os três mapas gerados por estes autores a partir de dados existentes na literatura sobre roda-trilho. Em todos os casos, a velocidade de deslizamento de 0,1 m/s esteve associada a um regime de desgaste

transiente entre o severo e o catastrófico (modos II e III), independente das cargas impostas. Já para a velocidade de 0,9 m/s, a Figura 2.56 mostra uma característica peculiar de tendência de diminuição de severidade. A mesma análise pode ser feita ao se observar a Figura 2.58.

Baseado no mapeamento dos regimes de desgaste de Lewis e Olofsson (2004), é de se esperar que o regime catastrófico aconteça em algum intervalo entre as velocidades de deslizamento de 0,1 m/s e 0,9 m/s, também para os materiais e carga utilizados nesta pesquisa.

4.2.4. Verificação da influência de encruamento dos discos no desgaste

O gráfico da Figura 4.37 apresenta os perfis de microdureza dos discos fundidos e forjados, ensaiados a velocidades de deslizamento de 0,1 m/s e 0,9 m/s. As medidas foram tomadas logo abaixo da trilha de desgaste.

Os valores obtidos para as diferentes condições de ensaio são muito próximos, com uma leve tendência de maior dureza para os discos fundidos. Diferentemente do que foi observado por Viáfara *et al* (2005), que obtiveram medidas de microdureza entre 500 e 800 $HV_{0,05}$ em profundidades de 10 mm abaixo da superfície, todas as medidas tomadas ficaram abaixo de 450 $HV_{0,05}$. Portanto, pode-se afirmar que não houve incidência de encruamento nas profundidades medidas e que este não foi um fator relevante para os diferentes níveis de desgaste encontrados.

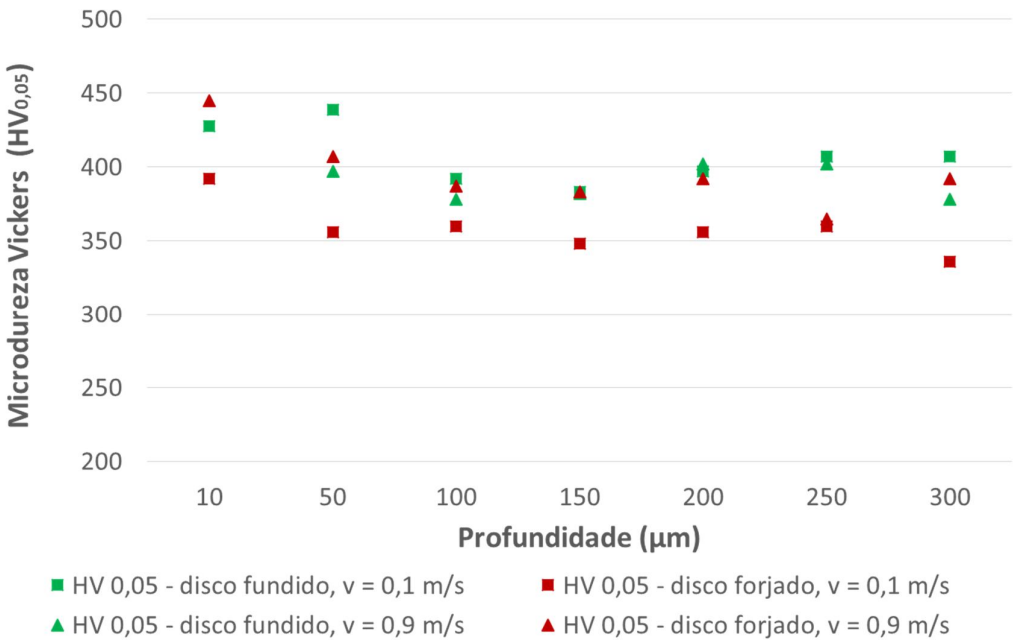


Figura 4.37 – Perfil de microdureza dos discos fundidos e forjados após a realização dos ensaios a velocidades de 0,1m/s e 0,9 m/s. Fonte: Autor.

5. CONCLUSÕES

Os discos fundidos apresentaram microestrutura heterogênea, com algumas regiões constituídas predominantemente por perlita fina e outras por bainita superior. Os discos forjados apresentaram uma microestrutura com distribuição de constituintes mais homogênea em relação ao material fundido, com colônias de perlita fina intercaladas com bainita e agregados de ferrita e carbonetos. Adicionalmente, apresentaram perlita degenerada. A microestrutura dos pinos é predominantemente perlítica.

Os diferentes materiais dos discos apresentaram valores muito próximos para a macro dureza: 341 ± 7 HV_{10} para os fundidos e 335 ± 3 HV_{10} para os forjados. Os pinos apresentaram dureza de 387 ± 4 HV_{10}.

Os ensaios realizados com discos fundidos e forjados apresentaram resultados próximos para o coeficiente de atrito, com uma tendência de menor atrito para os discos forjados, especialmente nos ensaios à velocidade de 0,1 m/s.

Houve uma diferença considerável no atrito médio para as diferentes velocidades de deslizamento utilizadas nos ensaios, com valores significativamente maiores para os ensaios à velocidade de 0,9 m/s, em torno de 0,8, enquanto que nos ensaios à velocidade de 0,1 m/s o coeficiente de atrito ficou aproximadamente em 0,5 e 0,6, para discos forjados e fundidos respectivamente.

A severidade do desgaste foi maior nos sistemas com discos forjados do que com discos fundidos, tanto para os pinos quanto para os próprios discos. Esta diferença ficou ainda mais acentuada na velocidade de 0,1 m/s.

Os mecanismos de desgaste dominantes de pinos e discos foram: adesão e esgotamento plástico, transferência de material e oxidação, em maior ou menor grau, para todas as condições ensaiadas.

Nos ensaios à velocidade de deslizamento de 0,1 m/s houve maior incidência de *debris* aderidos às superfícies de pinos e discos do que nos ensaios à velocidade de 0,9 m/s.

Os *debris* apresentaram considerável variação em suas dimensões: plaquetas grandes até 250 µm entre partículas muito pequenas, com dimensões menores

do que 5 µm e formato irregular. Em todas as plaquetas identificadas foi observada uma superfície rugosa, sugerindo que desgaste aconteceu na transição do regime severo para o catastrófico.

Neste trabalho, os sistemas com menor severidade no desgaste apresentaram uma tendência para maiores valores de atrito, evidenciando o caráter sistêmico do atrito e do desgaste.

Não houve incidência de encruamento nas profundidades medidas, portanto este não foi um fator relevante para os diferentes níveis de desgaste encontrados.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros, no intuito de dar continuidade a esta pesquisa, são:

- Aprofundar a análise da influência da microestrutura de discos fundidos e forjados no desgaste;
- Variar a carga e a velocidade de deslizamento, considerando valores abaixo de 0,1 m/s, buscando o regime moderado, e valores entre 0,1 m/s e 0,9 m/s, em busca do regime catastrófico;
- Empregar outros aços para os pinos e os discos, considerando as diferentes especificações de trilhos e rodas;
- Correlacionar os mecanismos de desgaste observados nos ensaios em laboratório com os mecanismos encontrados nas rodas e trilhos da EFVM.

7. REFERÊNCIAS

AAR – ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. M-107/M-208: Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles - Section G. Washington, 2014.

ASTM G40-13 – Standard terminology relating to wear and erosion, 2013.

ASTM G99 – Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus, 2010.

AREMA – AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. Washington, 2014.

BELLODI, Guilherme Colletes. **Otimização do intervalo entre reperfilamento das rodas dos vagões da Estrada de Ferro Carajás.** Belo Horizonte – MG, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2010.

BLAU, Peter J. **Embedding wear models into friction models.** Tribology Letters, 2009: n. 34, p. 75-79.

BOLTON, P. J.; CLAYTON, P. **Rolling-sliding wear damage in rail and tyre steels.** Wear, 1984: n. 93, p. 145-165.

BUSHAN, Bharat. **Modern tribology handbook.** Volume one: principles of tribology. Department of Mechanical Engineering, Ohio State University. Columbus, Ohio – 2001.

CHAVES, Ana Paula Gonçalves. **Rodas ferroviárias: análise, microestrutura e propostas de melhoria**. São Paulo – SP. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

CLAYTON, P. **The wear behaviour of pearlitic steels with particular reference to rail steels**, Ph.D. Thesis, 1977. Em: BOLTON, P. J.; CLAYTON, P. **Rolling-sliding wear damage in rail and tyre steels.** Wear, 1984: n. 93, p. 145-165.

CLAYTON, P. **Tribological aspects of wheel-rail contact:** a review of recent experimental research. Wear, 1996: n. 191, p. 170-183.

COLPAERT, Humbertus. **Metalografia dos processos siderúrgicos comuns.** 4ª Edição. São Paulo – SP, 2008.

CZICHOS, H. **Presentation of friction and wear data, in Blau, P. J. (ed.), Friction, Lubrication and Wear Technology**. ASM Handbook, vol. 18, ASM International, Materials Park. Ohio, USA, 1992: p. 489–492. Em: LEWIS, R.; OLOFSSON, U. **Basic tribology of the wheel-rail contact.** Wheel-rail interface handbook, 1st Edition, 2009: p. 34-57.

DALMASO, Alanderson. **Análise de vida em motores de tração de corrente contínua das locomotivas na EFVM**. Vila Velha – ES, Faculdade Novo Milênio, 2010.

DANKS, D.; CLAYTON, P. **Comparison of the wear process for eutectoid rail steels**: field and laboratory tests. Wear, 1987: n. 120, p. 233-250.

Department of Education and Science. **A report on the present position and industry's needs**. Londres, 1966.

DOWSON, Duncan. **History of tribology** – second edition. Londres, 1998.

FALQUETO, Leandro Entringer. **Estudo do desgaste por deslizamento de ligas de cobalto.** Vitória – ES. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, 2015.

FREITAS, Isaias Moreira de. **Análise de propriedades e metalografia de rodas ferroviárias microligadas**. Vitória – ES. Dissertação de Mestrado, Instituto Federal do Espírito Santo, 2015.

FURUHARA, T.; MORITANI, T.; SAKAMOTO, K.; MAKI, T. **Substructure and crystallography of degenerate pearlite in an Fe-C binary alloy.** Materials Science Forum, 2007: vol. 539-543, p. 4832-4837.

HARRIS, T. A. **Rolling Bearing Analysis.** Wiley, Nova York, EUA, 1991. Em: LEWIS, R.; OLOFSSON, U. **Basic tribology of the wheel-rail contact.** Wheel-rail interface handbook, 1st Edition, 2009: p. 34-57.

HE, C. G.; GUO, J.; LIU, Q. Y.; WANG, W. J. **Experimental investigation on the effect of operating speeds on wear and rolling contact fatigue damage of wheel materials,** 2016.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology:** friction and wear of engineering materials. University of Cambridge - Department of Materials Science and Metallurgy. Londres, 1992.

JENDEL, T. **Prediction of wheel profile wear - methodology and verification.** Royal Institute of Technology, Suécia, 2000. Em: OLOFSSON, U.; TELLISKIVI, T. **Wear, plastic deformation and friction of two rail steels - a full-scale test and laboratory study.** Wear, 2003: n. 254, p. 80–93.

JFE STEEL CORPORATION - Catálogo. Disponível em : <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/shapes/catalog/d1e-001.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2016.

JIANG, Jiaren; STOTT, F. H.; STACK, M. M. **A mathematical model for sliding wear of metals at elevated temperatures.** Wear, 1995: n. 181-183, p. 20-31.

JIANG, Jiaren; STOTT, F. H.; STACK, M. M. **The role of triboparticulates in dry sliding wear.** Tribology International, 1998: vol. 31, n. 5, p. 245-256.

JOHNSON, K. L. **Contact Mechanics.** Cambridge University Press, Inglaterra, 1985.

KALKER, J. J. **On the rolling contact of tow elastic bodies in the presence of dry friction**. Delft: Delft University of Technology 1967. Ph.D. Thesis – Department of Mechanical Engineering, Delft University of Technology 1967. Em: SANTOS, Francisco de Carvalho. **Análise do contato roda-trilho e sua**

influência na vida em serviço de rodas ferroviárias. Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

KNOTHE, K.; THEILER, A.; GÜNEY, S. **Proceedings of the 16th IAVSD Conference on Investigation of Contact Stresses on the Wheel/Rail-System at Steady State Curving.** África do Sul, 1999. Em: OLOFSSON, U.; TELLISKIVI, T. **Wear, plastic deformation and friction of two rail steels - a full-scale test and laboratory study.** Wear, 2003: n. 254, p. 80–93.

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. **Basic tribology of the wheel-rail contact.** Wheel-rail interface handbook, 1st Edition, 2009: p. 34-57.

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. **Mapping rail wear regimes and transitions**. Wear, 2004: n. 257, p. 721-729.

MACEDO, M.L.K.; SILVA, A. A. M.; BARLAVENTO, M. A.; REGULY, A. **Avaliação mecânica e metalúrgica em trilho ferroviário utilizado em via contínua.** Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Laboratório de Metalurgia Física, 2001.

MACÊDO, Fernanda Bittencourt. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários.** Juiz de Fora – MG. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009.

MACHADO, Admilses *et al*. **Manual Técnico da Via Permanente.** Vale, 2009.

MAIA, Fernando Silvano; MELLO, Ricardo Silva Homem de; CARDOSO, Kátia Regina; VILLAS BOAS, Renato Lyra. **Análise microestrutural da variação da têmpera na pista de rolamento das rodas ferroviárias.** São José dos Campos – SP, 2010.

MINICUCCI, Domingos José; VILLAS BOAS, Renato Lyra; OLIVEIRA, Luis Gustavo de. **Development of micro alloy wheel with niobium.** São Paulo – SP. A ser publicado em 2017.

OLOFSSON, U.; TELLISKIVI, T. **Wear, plastic deformation and friction of two rail steels - a full-scale test and laboratory study.** Wear, 2003: n. 254, p. 80–93.

PEREIRA, Olyntho Carmo. **Soluções de otimização da eficiência energética de uma ferrovia de carga:** O caso da Estrada de Ferro Carajás – EFC. Rio de Janeiro – RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, abr. 2009.

PEREZ-UNZUETA, Alberto J.; BEYNON, John H. **Microstructure and wear resistance of pearlitic rail steels**. Wear, 1993: n. 162-164, p. 173-182.

SANTOS, Francisco de Carvalho. **Análise do contato roda-trilho e sua influência na vida em serviço de rodas ferroviárias**. Campinas – SP. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

SANTOS, Zirlene Alves da Silva; SOUZA, Claudiano de Jesus de; COSTA, Adilson Rodrigues da. **A metodologia BSCEQ na seleção de materiais para otimização do desgaste de coroas de perfuração de uma indústria de**

sondagem. Revista Tecnologia em Metaturgia, Materiais e Mineração, 2012: n. 3, p. 212-219.

SEMPREBONE, Paula da Silva. **Desgaste em trilhos ferroviários:** um estudo teórico. Campinas – SP. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

SHEVTSOV, Ivan Y. **Wheel/rail interface optimization**. Holanda, Delft University of Technology, 2008.

SINGH, U. P.; SINGH, Ramakant. **Wear investigation of wheel and rail steels under conditions of sliding and rolling-sliding contact with particular regard to microstructural parameters**. Wear, 1993: n. 170, p. 93-99.

STACHOWIAK, G. W. **Wear – materials, mechanisms and practice.** John Wiley & Sons, Inglaterra, 2006.

STOTT, F. H. **High-temperature sliding wear of metals.** Tribology International, 2002: n. 35, p. 489-495.

SUH, N. P.; SIN, H. C. **The genesis of friction**. Wear, 1981: n. 69, p. 91–114. Em: LEWIS, R.; OLOFSSON, U. **Basic tribology of the wheel-rail contact.** Wheel-rail interface handbook, 1st Edition, 2009: p. 34-57.

SUNDH, Jon; OLOFSSON, Ulf; SUNDVALL, Krister. **Seizure and wear rate testing of wheel-rail contacts under lubricated conditions using pin-on-disc methodology.** Wear, 2008: n. 265, p. 1425-1430.

VIÁFARA, C.C.; CASTRO, M. I.; VÉLEZ, J. M.; TORO, A. **Unlubricated sliding wear of pearlitic and bainitic steels**. Wear, 2005: n. 259, p. 405-411.

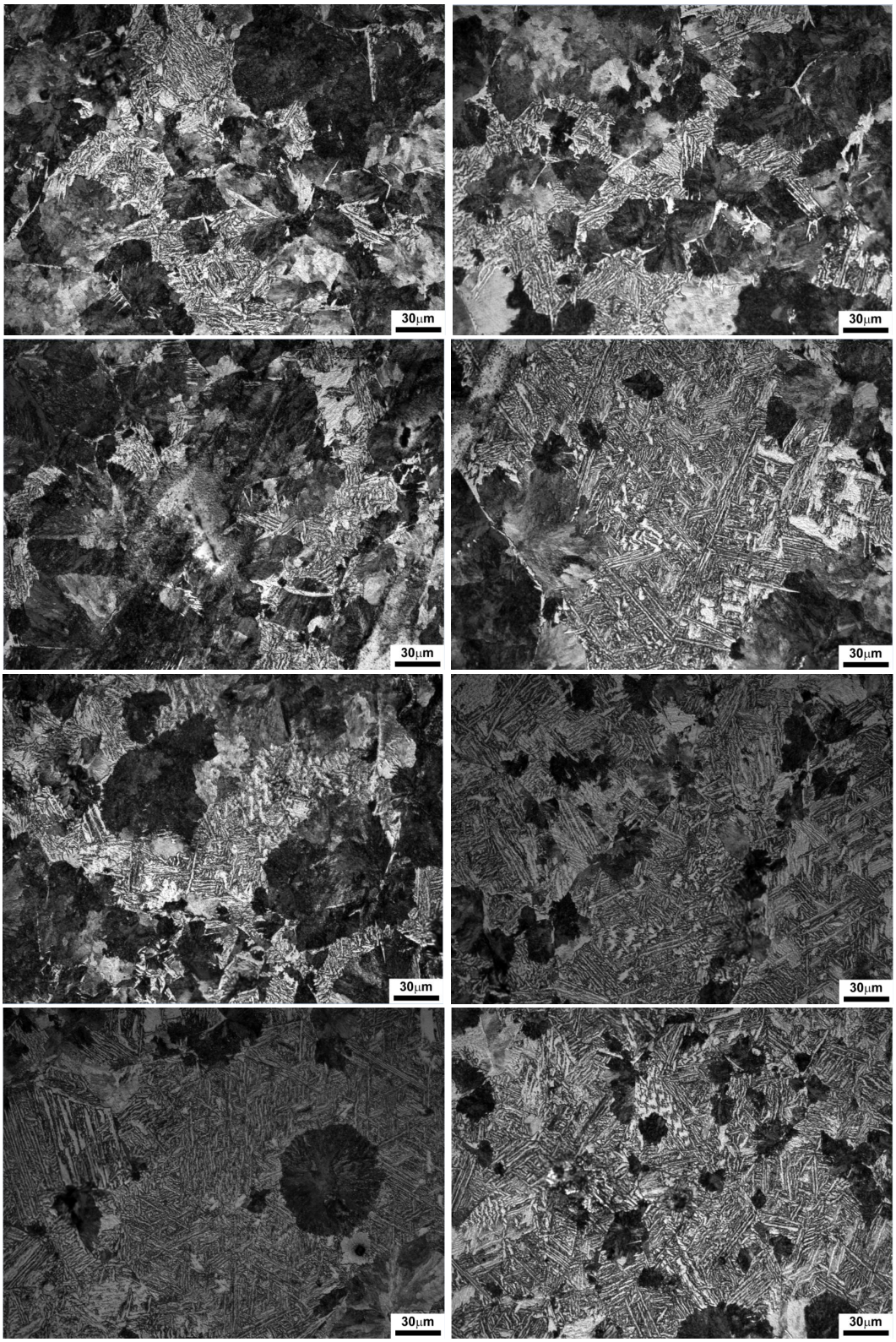
ZENG, D.; LU, L.; GONG, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, J. **Influence of solid solution strengthening on spalling behavior of railway wheel steel,** 2016.

ZHU, Y.; LYU, Y.; OLOFSSON, U. **Mapping the friction between railway wheels and rails focusing on environmental conditions**. Wear, 2015: n. 324-325, p. 122-128.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials.** Elsevier, 1987.

APÊNDICE A

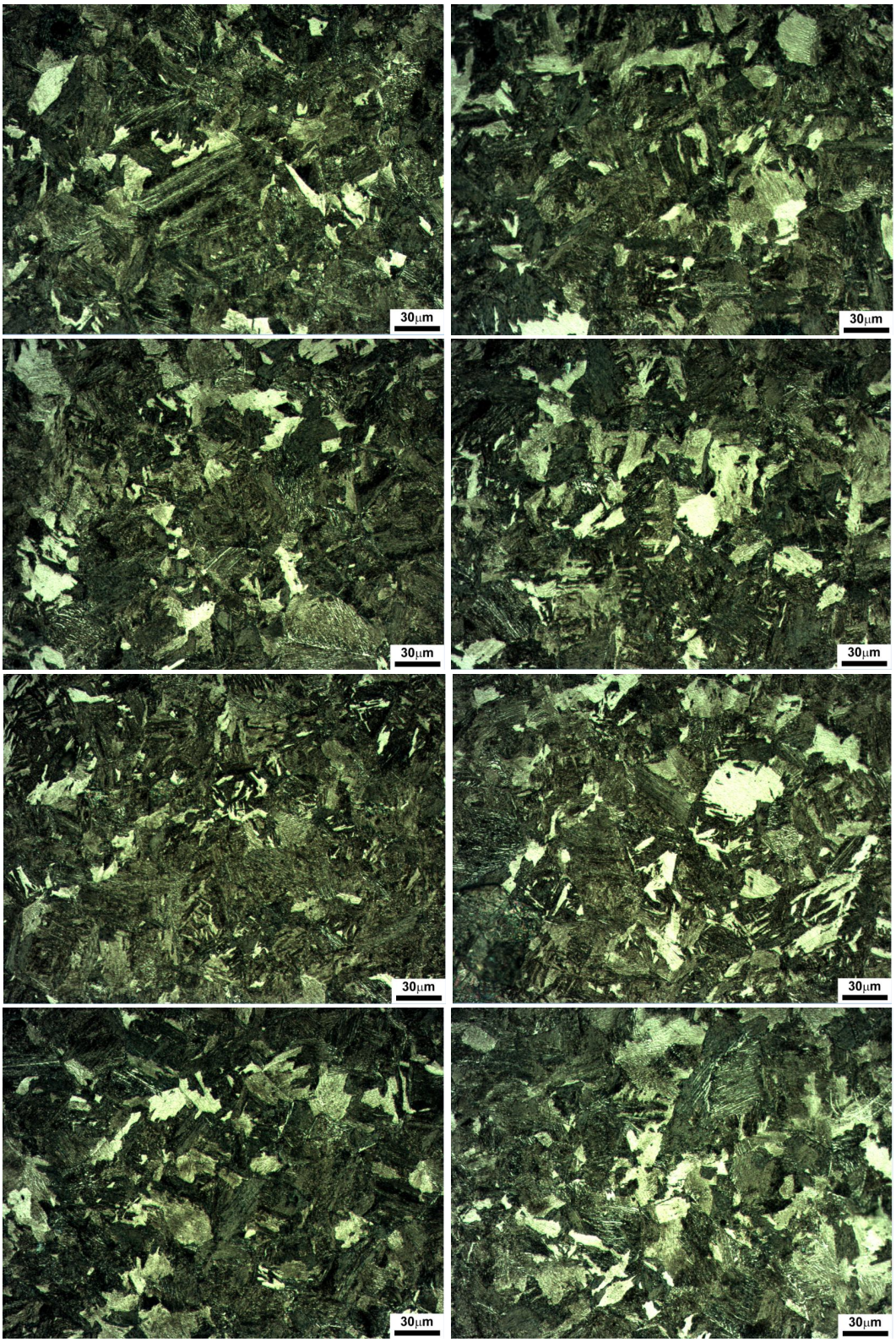
Microestrutura de discos fundidos



Imagens de discos fundidos, obtidas através de microscopia óptica

APÊNDICE B

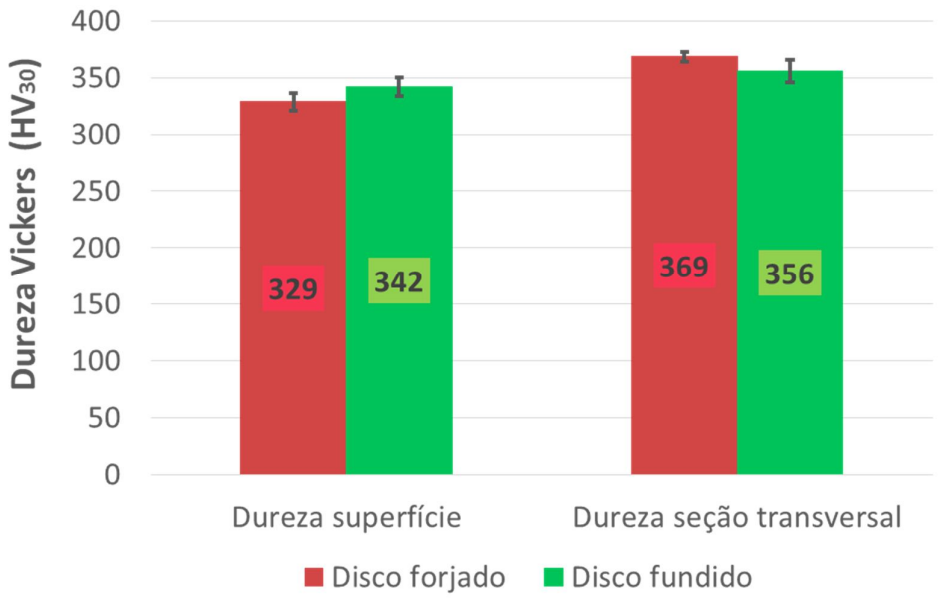
Microestrutura de discos forjados



Imagens de discos forjados, obtidas através de microscopia óptica

APÊNDICE C

Dureza Vickers dos discos, medida com carga de 30 kgf



Resultados de dureza Vickers da superfície e seção transversal dos discos, com carga de 30 kgf.

Assim como aconteceu para a carga de 10 kgf, não houve diferença significativa entre os discos fundidos e forjados, somente uma tendência de menor dureza para o material forjado na superfície a ser ensaiada. Para a seção transversal, novamente os resultados de dureza foram próximos, desta vez com tendência de menor dureza para o material fundido.