ANA PAULA GONÇALVES CHAVES

Relação entre a microestrutura e a resistência ao desgaste na pista de rolamento de rodas ferroviárias em suas múltiplas vidas

São Paulo
2022

ANA PAULA GONÇALVES CHAVES

Relação entre a microestrutura e a resistência ao desgaste na pista de rolamento de rodas ferroviárias em suas múltiplas vidas

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

São Paulo
2022

ANA PAULA GONÇALVES CHAVES

Relação entre a microestrutura e a resistência ao desgaste na pista de rolamento de rodas ferroviárias em suas múltiplas vidas

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Hélio Goldenstein

São Paulo
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.
São Paulo, 12 de janeiro de 2022

Assinatura do autor: Ana Paula G. Chaves

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-Publicação

Chaves, Ana Paula Gonçalves

Relação entre a microestrutura e a resistência ao desgaste na pista de rolamento de rodas ferroviárias em suas múltiplas vidas / A. P. G. Chaves.— versão corr. - São Paulo, 2022.

165p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Rodas Ferroviárias 2. Desgaste por Deslizamento 3. Desgaste por Rolamento 4. Fadiga de Contato por Rolamento I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Nome: CHAVES, Ana Paula Gonçalves

Título: Relação entre a microestrutura e a resistência ao desgaste na pista de rolamento de rodas ferroviárias em suas múltiplas vidas

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Aprovada em: 16 de novembro de 2021.

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Hélio Goldenstein (presidente)
Instituição: EP – USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Luiz Henrique Dias Alves (titular)
Instituição: UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Paulo Roberto Mei (titular)
Instituição: UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Cherlio Scandian (titular)
Instituição: UFES – Universidade Federal do Espírito Santo
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Tiago Cousseau (titular)
Instituição: UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Julgamento: Aprovado

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha principal fonte de inspiração: meus filhos, Gustavo e Giovana.

AGRADECIMENTOS

Ao André, meu companheiro de jornada, pela compreensão, incentivo, dedicação, suporte, afeto e parceria em todos os momentos. Aos meus pais (Marcilia e Jariby – *in memoriam*) e à minha irmã Ana Maria por sempre apoiarem minhas decisões e compreenderem minha ausência em tantos momentos importantes. À minha família, pela união, suporte e muito carinho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hélio Goldenstein, pela oportunidade oferecida no mestrado e por continuar me apoiando no doutorado, por todo conhecimento transmitido nas aulas e nas conversas, sejam acadêmicas ou não, pela confiança depositada em meu trabalho e pelos ótimos conselhos de vida.

Ao Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves, pelas sugestões e comentários em todas as etapas do trabalho e por todo conhecimento compartilhado sobre questões da indústria e da pesquisa ferroviária.

Aos colegas que ainda estão ou já fizeram parte do Laboratório de Transformações de Fases (LTF-PMT-USP): Henrique, Lucas, Arthur, Viviam, Pedro, Giovani, Samuel, Jacy, por toda parceria e amizade e em especial ao Danny Centeno e ao Luiz Bauri pela ajuda na realização de alguns ensaios.

À equipe de professores, pesquisadores, alunos e funcionários do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS-PME-USP): Prof. Dr. Amilton Sinatora, Prof. Dr. Luiz Alberto Franco, Prof. Dr. Roberto Martins, Gustavo, Juan, Thiago, Raphael, Rafael, Silene, Sidney (*in memoriam*), em especial aos professores pelas valiosas discussões sobre tribologia, disponibilização dos equipamentos e instalações para realização dos ensaios de desgaste por deslizamento puro.

Ao Prof. Dr. Alejandro Toro e toda equipe da Universidade Nacional da Colômbia – Campus Medellín, pela receptividade durante minha estadia na universidade e disponibilização dos tribômetros para a realização dos ensaios disco contra disco, além de todo suporte para interpretação dos resultados e discussões.

Ao Prof. Dr. Tiago Cousseau, sua equipe de pesquisa e ao Prof. Dr. Júlio Klein, ambos da UTFPR, pela disponibilização do microdurômetro para finalização das

minhas análises e por me receberem em seu laboratório, além de todas as conversas sobre as análises e resultados desse trabalho.

À equipe do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT-USP), professores (em especial ao Prof. Dr. André Tschiptschin e ao Prof. Dr. Eduardo Monlevade), técnicos (Daniel Rodrigues, José Rubens, Lívio Nunes) e funcionários (Suellen e Tina).

À empresa ArcelorMittal – Monlevade, na figura do Engenheiro Helder Carvalho Ferreira, pela doação das ligas de aço 1080 utilizadas nos ensaios de desgaste por deslizamento puro.

À empresa AmsteadMaxion – Cruzeiro, representada pelo Engenheiro Roger Nascimento pela doação das amostras de rodas ferroviárias para realização dos ensaios de desgaste por deslizamento, desgaste por rolamento e de resistência à fadiga de contato por rolamento.

Ao Instituto Tecnológico da Vale S.A. (ITV) pelo suporte financeiro através da Fundação Para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE) por meio do projeto Cátedra Vale Roda-Trilho.

O presente trabalho foi realizado com apoio do financeiro Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio de uma bolsa de doutorado – processo 140116/2017-6.

RESUMO

CHAVES, Ana Paula Gonçalves. **Relação entre a microestrutura e a resistência ao desgaste na pista de rolamento de rodas ferroviárias em suas múltiplas vidas**. 2022. 165f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Em serviço habitual as rodas ferroviárias têm a sua pista de rolamento e friso degradadas por desgaste e por fadiga de contato por rolamento (RCF) acumulado, porém o modo dominante de dano depende de variáveis construtivas e de operação. Para estudar o comportamento tribológico do sistema roda-trilho, ensaios do tipo pino contra disco e disco contra disco são amplamente utilizados. Esse trabalho estuda a relação entre as microestruturas encontradas nas rodas ferroviárias e a resistência ao desgaste por deslizamento puro, por rolamento com escorregamento e a resistência à fadiga de contato por rolamento. Na primeira etapa, utilizando um material modelo, é analisada a resistência ao desgaste por deslizamento puro (pino contra disco) das microestruturas comumente encontradas em rodas ferroviárias. Na segunda etapa, amostras de três diferentes profundidades do aro de uma roda ferroviária correspondentes às múltiplas vidas são analisadas quanto à resistência ao desgaste por deslizamento puro, por rolamento com escorregamento e resistência à fadiga de contato por rolamento. No aro das rodas ferroviárias foram encontradas as seguintes microestruturas para cada vida: bainita (1ª vida), bainita e perlita com ferrita em contorno de grão (2ª vida) e perlita (3ª vida). Nos ensaios por deslizamento puro constatou-se regime de desgaste oxidativo moderado; amostras com microestrutura perlítica fina obtiveram a melhor resistência ao desgaste por deslizamento e mantiveram a microestrutura lamelar característica mesmo em regiões severamente deformadas. Os ensaios de rolamento apresentaram regime moderado de desgaste com até 3% de escorregamento e regime severo para 5% de escorregamento; maiores escorregamentos geraram maiores perdas de massa e menores períodos de *running-in*. Concluiu-se que a perlita (3ª vida) apresenta uma melhor resistência a RCF caracterizada pelo maior tempo até o início de *shelling*. A microestrutura heterogênea (2ª vida) obteve o pior desempenho quanto a RCF, devido, provavelmente, à maior facilidade de uma trinca se propagar nas interfaces de estruturas com diferentes durezas.

Palavras-chave: Rodas Ferroviárias. Desgaste por deslizamento. Desgaste por rolamento. Fadiga de contato por rolamento.

ABSTRACT

CHAVES, Ana Paula Gonçalves. **Relationship between microstructure and wear resistance in the tread of railway wheels in their multiple lives**. 2022. 165f. Dissertation (Doctorate in Metallurgical and Materials Engineering) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

In normal service, railway wheels have their tread and flange degraded by wear and accumulated rolling contact fatigue (RCF), but the dominant mode of damage depends on construction and operating variables. To study the tribological behavior of railway wheels, pin-on-disc and disc-on-disc tests are widely used. This work studies the relationship between the microstructures found in railway wheels and the resistance to pure sliding wear, to rolling-sliding, and the resistance to rolling contact fatigue. In the first step, using a model material, the pure sliding wear resistance (pin-on-disc) of the microstructures commonly found in railway wheels is analyzed. In the second step, samples from three different depths of a rail wheel rim corresponding to the multiple lives are analyzed for pure sliding wear resistance, for rolling with slip, and for rolling contact fatigue resistance. In the rim of the railway wheels, the following microstructures were found for each life: bainite (1st wear), bainite and pearlite with ferrite in grain boundary (2nd wear), and pearlite (3rd wear). In the pure sliding tests, a moderate oxidative wear regime was observed; samples with fine pearlitic microstructure obtained the best resistance to sliding wear and maintained the most cohesive microstructure even in severely deformed regions. The rolling tests showed a moderate wear regime with up to 3% slip and severe wear with 5% slip; larger slips generated greater mass losses and shorter running-in periods. It was concluded that pearlite (3rd wear) has a better resistance to RCF, characterized by a longer time until shelling begins. The heterogeneous microstructure (2nd wear) had the worst performance with respect to RCF, probably due to the greater ease for a crack to propagate at the interfaces of structures with different hardness.

Keywords: Railway wheels. Sliding wear. Rolling wear. Rolling Contact Fatigue.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 - MAPA FERROVIÁRIO BRASILEIRO DAS EMPRESAS ASSOCIADAS À ANTF. 29
FIGURA 2.2- TRANSPORTE FERROVIÁRIO ANUAL EM BILHÕES DE TKU (TONELADA QUILÔMETRO ÚTIL TRANSPORTADA) POR MERCADORIA NO BRASIL DURANTE O PERÍODO DE 1997 ATÉ 2019. 30
FIGURA 2.3 - COMPETIÇÃO MODAL NO TRANSPORTE DE CARGA SEGUNDO A DISTÂNCIA PERCORRIDA E A CARGA TRANSPORTADA. 31
FIGURA 2.4 - PRODUÇÃO BRASILEIRA ANUAL DE VAGÕES E LOCOMOTIVAS ENTRE OS ANOS DE 1996 E 2020 E PREVISÃO PARA 2021. A) VAGÕES E B) LOCOMOTIVAS. 32
FIGURA 2.5 – PERFIL DE UMA RODA FERROVIÁRIA COM A NOMENCLATURA DAS SUAS PRINCIPAIS REGIÕES EM PORTUGUÊS E EM INGLÊS. 33
FIGURA 2.6 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA PERLÍTICA ENCONTRADA EM AMOSTRAS DE AÇO 1080 TRATADAS ISOTERMICAMENTE A A) 700°C E B) 600°C. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 38
FIGURA 2.7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA FORMAÇÃO DA BAINITA SUPERIOR E DA BAINITA INFEIROR A PARTIR DA AUSTENITA. 39
FIGURA 2.8 – PRINCIPAIS DEFEITOS ENCONTRADOS EM RODAS FERROVIÁRIAS. A) PONTO ÚNICO DE *SPALLING* DEVIDO À REMOÇÃO DE MARTENSITA, B) MARCAS DE *SHELLING*, C) TRINCAS TÉRMICAS COM ORIENTAÇÃO AXIAL. 41
FIGURA 2.9 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO TIPO DE DESGASTE EM FUNÇÃO DO MOVIMENTO RELATIVO ENTRE AS SUPERFÍCIES. 43
FIGURA 2.10 - DESENHO ESQUEMÁTICO DOS PRINCIPAIS MECANISMOS DE DESGASTE. 43
FIGURA 2.11 – TAXA DE DESGASTE EM FUNÇÃO DA CARGA PARA UM AÇO COM 0,52%C. VELOCIDADE DE DESLIZAMENTO 100 CM/S. **X** PINO E **O** CILINDRO. 46
FIGURA 2.12 - MAPA DOS MECANISMOS DE DESGASTE PARA CONFIGURAÇÃO PINO CONTRA DISCO COM AMOSTRAS DE AÇO EM FUNÇÃO DA PRESSÃO E VELOCIDADE NORMALIZADAS. ...47
FIGURA 2.13 – VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO EM ENSAIOS DE PINO SOBRE ANEL PARA (1) AÇO CARBONO, (2) AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO, (3) 70/30 LATÃO, (4) STELLITE E (5) AÇO FERRAMENTA. 48
FIGURA 2.14 – CURVA TÍPICA DO COEFICIENTE DE ATRITO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO OU TEMPO DE ENSAIO PARA DESLIZAMENTO PURO A SECO DE METAIS. 49

FIGURA 2.15 - VARIAÇÃO DA PERDA DE MASSA MÉDIA DOS PINOS EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO INTERLAMELAR DA PERLITA APÓS ENSAIOS DE PINO CONTRA DISCO COM CARGA DE 10,38 N E 3.600 SEGUNDOS DE DURAÇÃO. 50
FIGURA 2.16 – DIFERENTES FORMAS DA RESPOSTA ESTRUTURAL PARA CARREGAMENTOS CÍCLICOS: (A) ELÁSTICO, (B) *SHAKEDOWN* ELÁSTICO, (C) *SHAKEDOWN* PLÁSTICO OU PLASTICIDADE CÍCLICA, (D) *RATCHETTING*. 53
FIGURA 2.17 – DIAGRAMA DE *SHAKEDOWN*. DEFORMAÇÃO ACUMULADA EM CONTATO ROLANTE-DESLIZANTE. 54
FIGURA 2.18 – DESGASTE NO SISTEMA RODA-TRILHO EM FUNÇÃO DA RAZÃO ENTRE A DUREZA DO TRILHO E DA RODA. 56
FIGURA 2.19 – REGIMES DE DESGASTE IDENTIFICADOS DURANTE ENSAIOS DISCO CONTRA DISCO DE MATERIAL DO RODA CLASSE D CONTRA TRILHO. 59
FIGURA 3.1 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS E ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR DESLIZAMENTO PURO PARA UM MATERIAL MODELO.....61
FIGURA 3.2 – DESENHO ESQUEMÁTICO DOS CORPOS DE PROVA DE A) PINO E B) DISCO UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO PURO. DIMENSÕES EM MM. ...62
FIGURA 3.3 - DESENHO ESQUEMÁTICO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS REALIZADOS NO DILATÔMETRO. 64
FIGURA 3.4 - PLINT TE-79 - EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA OS ENSAIOS DE DESGASTE PINO – DISCO. 67
FIGURA 3.5 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM ENSAIO PINO CONTRA DISCO.....67
FIGURA 3.6 – VALORES DE MICRODUREZA VICKERS EM FUNÇÃO DO TIPO DE TRATAMENTO TÉRMICO AOS QUAIS AS AMOSTRAS FORAM SUBMETIDAS. P (PERLITA), B (BAINITA), BR (BAINITA REVENIDA) E MR (MARTENSITA REVENIDA). 72
FIGURA 3.7 – ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA AMOSTRA 700C TRATADA ISOTERMICAMENTE NO PATAMAR DE 700 °C. DUREZA 225 HV. PERLITA: 243 ± 9 NM. A) SE - 5.000X B) SE - 20.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).....73
FIGURA 3.8 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA AMOSTRA 625C TRATADA ISOTERMICAMENTE NO PATAMAR DE 625 °C. DUREZA 320 HV. PERLITA: 128 ± 6 NM. A) SE - 5.000X B) SE - 20.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).....74
FIGURA 3.9 – ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA AMOSTRA 550C TRATADA ISOTERMICAMENTE NO PATAMAR DE 550 °C. DUREZA 382 HV. PERLITA: 70 ± 4 NM . A) SE - 5.000X B) SE - 20.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).....74

FIGURA 3.10 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA AMOSTRA 300C TRATADA ISOTERMICAMENTE NO PATAMAR DE 300 °C. DUREZA 594 HV. BAINITA. A) SE - 5.000X B) SE - 10.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).....75
FIGURA 3.11 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA AMOSTRA 300CR TRATADA ISOTERMICAMENTE NO PATAMAR DE 300 °C E REVENIDA A 500 °C DURANTE 30 MINUTOS. DUREZA 353 HV. BAINITA REVENIDA. A) SE - 5.000X B) SE - 10.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 76
FIGURA 3.12 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA AMOSTRA 50CR TRATADA ISOTERMICAMENTE NO PATAMAR DE 50 °C E REVENIDA À 500 °C DURANTE 30 MINUTOS. DUREZA MÉDIA 363 HV. MARTENSITA REVENIDA. A) SE – 5.000X B) SE – 10.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 76
FIGURA 3.13 - PERDA DE MASSA MÉDIA DOS PINOS DE MATERIAL MODELO APÓS ENSAIOS DE DESGASTE PINO CONTRA DISCO EM FUNÇÃO DA DUREZA VICKERS ANTES DOS ENSAIOS.....78
FIGURA 3.14 - CURVA PROVENIENTE DO ENSAIO DILATOMÉTRICO. ETAPA DE RESFRIAMENTO AO AR DESDE A TEMPERATURA DE 300 °C ATÉ 50 °C PARA UMA AMOSTRA 300C UTILIZADA EM ENSAIOS PINO CONTRA DISCO. 79
FIGURA 3.15 - CURVAS DO COEFICIENTE DE ATRITO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO PARA AS AMOSTRAS A) 300C, B) 300CR E C) 50CR. 81
FIGURA 3.16 - COEFICIENTE DE ATRITO MÉDIO APÓS ETAPA DE *RUNNING-IN* EM FUNÇÃO DA DUREZA DE CADA MICROESTRUTURA NOS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO COM MATERIAL MODELO. 83
FIGURA 3.17 - MAPA DOS MECANISMOS DE DESGASTE PARA CONFIGURAÇÃO PINO CONTRA DISCO PARA MATERIAL MODELO. 84
FIGURA 3.18 - AMOSTRA 300C – BAINITA INFERIOR. 594 HV. - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO PINO DE MATERIAL MODELO PROVENIENTE DO ENSAIO PINO CONTRA DISCO. A) SE - 10.000X B) SE - 15.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).....85
FIGURA 3.19 - AMOSTRA 300CR – BAINITA REVENIDA. 353 HV. - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO PINO DE MATERIAL MODELO PROVENIENTE DO ENSAIO PINO CONTRA DISCO. A) SE -10.000X B) SE - 15.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).....86
FIGURA 3.20 – AMOSTRA 50CR – MARTENSITA REVENIDA. 363 HV. - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO PINO DE

MATERIAL MODELO PROVENIENTE DO ENSAIO PINO CONTRA DISCO. A) SE - 10.000X B) SE - 5.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).....86
FIGURA 3.21 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA CAMADA DEFORMADA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DOS PINOS APÓS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO. 87
FIGURA 3.22 - VARIAÇÃO DA MICRODUREZA DOS PINOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DESDE A SUPERFÍCIE DE CONTATO COM O DISCO (SUPERFÍCIE DESGASTADA NOS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO). 88
FIGURA 4.1 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS E ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR DESLIZAMENTO PURO NAS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA. ..92
FIGURA 4.2 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA REGIÃO DE RETIRADA DOS PINOS DAS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS PINO CONTRA DISCO. DIMENSÕES EM MM. 93
FIGURA 4.3 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA RODA ANALISADA EM SUA 1° VIDA DISTANTE 10 MM DESDE A PISTA DE ROLAMENTO. A) SE - 5.000X B) SE - 15.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 95
FIGURA 4.4 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA RODA ANALISADA EM SUA 2° VIDA DISTANTE 30 MM DESDE A PISTA DE ROLAMENTO. A) SE - 5.000X B) SE - 15.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 96
FIGURA 4.5 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA RODA ANALISADA EM SUA 3° VIDA DISTANTE 50 MM DESDE A PISTA DE ROLAMENTO. A) SE - 5.000X B) SE - 15.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 97
FIGURA 4.6 – MICRODUREZA VICKERS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DESDE A PISTA DE ROLAMENTO DE UMA RODA FERROVIÁRIA CLASSE D (MÚLTIPLAS VIDAS). 98
FIGURA 4.7 - PERDA DE MASSA APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO PURO E DUREZA DOS PINOS DE MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA. 100
FIGURA 4.8 – VALORES DA MICRODUREZA E DO COEFICIENTE DE DESGASTE PARA AS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO PURO. 101
FIGURA 4.9 - MAPA DOS MECANISMOS DE DESGASTE PARA CONFIGURAÇÃO PINO CONTRA DISCO PARA AS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA FUNDIDA MICROLIGADA. 102
FIGURA 4.10 - CURVAS DO COEFICIENTE DE ATRITO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO NOS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO. A) 1°VIDA, B) 2° VIDA E C) 3° VIDA. 104
FIGURA 4.11 - COEFICIENTE DE ATRITO MÉDIO APÓS ETAPA DE RUNNING-IN EM FUNÇÃO DA DUREZA DA MICROESTRUTURA NOS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO. 105

FIGURA 4.12 - ASPECTO DA SUPERFÍCIE DOS PINOS DE 1° VIDA DA RODA FERROVIÁRIA ESTUDADA APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO. A) SE B) BSC. 106
FIGURA 4.13 - ASPECTO DA SUPERFÍCIE DOS PINOS DE 2° VIDA DA RODA FERROVIÁRIA ESTUDADA APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO. A) SE B) BSC. 106
FIGURA 4.14 - ASPECTO DA SUPERFÍCIE DOS PINOS DE 3° VIDA DA RODA FERROVIÁRIA ESTUDADA APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO. A) SE B) BSC. 107
FIGURA 4.15 - AMOSTRA 1° VIDA. ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO PINO DE MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA FUNDIDA PROVENIENTE DO ENSAIO PINO CONTRA DISCO. A) SE - 5.000X B) SE - 15.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 108
FIGURA 4.16 - AMOSTRA 2° VIDA. ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO PINO DE MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA FUNDIDA PROVENIENTE DO ENSAIO PINO CONTRA DISCO. A) SE - 5.000X B) SE - 15.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 109
FIGURA 4.17 - AMOSTRA 3° VIDA. ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO PINO DE MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA FUNDIDA PROVENIENTE DO ENSAIO PINO CONTRA DISCO. A) SE - 5.000X B) SE - 15.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 110
FIGURA 4.18 - VARIAÇÃO DA MICRODUREZA DOS PINOS DE RODA FERROVIÁRIA EM SUAS MÚLTIPLAS VIDAS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DESDE A SUPERFÍCIE DESGASTADA APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE PINO CONTRA DISCO.....111
FIGURA 4.19 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS E ENSAIOS PARA ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ROLAMENTO COM ESCORREGAMENTO VARIÁVEL E À FADIGA DE CONTATO POR ROLAMENTO (RCF) NAS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA.115
FIGURA 4.20 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA REGIÃO DE RETIRADA DOS DISCOS DAS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA E DE UM TRILHO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DISCO CONTRA DISCO. DIMENSÕES EM MM.....116
FIGURA 4.21 – DESENHO ESQUEMÁTICO COM AS DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NOS ENSAIOS DISCO CONTRA DISCO. DIMENSÕES EM MM. 117
FIGURA 4.22 - TRIBÔMETRO DISCO CONTRA DISCO COM CONTROLE DE ROTAÇÃO INDEPENDENTE EM CADA EIXO PERTENCENTE AO GTS – GRUPO DE TRIBOLOGIA Y SUPERFICIES DA UNIVERSIDADE NACIONAL DE COLÔMBIA – CAMPUS MEDELLÍN. 118

FIGURA 4.23 – ESQUEMA DA MONTAGEM DOS DISCOS NO TRIBÔMETRO DISCO CONTRA DISCO PERTENCENTE AO GTS – GRUPO DE TRIBOLOGIA Y SUPERFICIES DA UNIVERSIDADE NACIONAL DE COLÔMBIA – CAMPUS MEDELLÍN. 119
FIGURA 4.24 – ESQUEMA DOS CORTES NECESSÁRIOS PARA EXTRAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE DA SUB-SUPERFÍCIE. 123
FIGURA 4.25 – ASPECTO DA MICROESTRUTURA DO TRILHO FERROVIÁRIO PREMIUM DHH370HB. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).....125
FIGURA 4.26 - PERDA DE MASSA DAS RODAS EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE ESCORREGAMENTO (0,5%, 1%, 2%, 3% E 5%) PARA AS TRÊS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA. 126
FIGURA 4.27 - PERDA DE MASSA DOS TRILHOS EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE ESCORREGAMENTO (0,5%, 1%, 2%, 3% E 5%) PARA AS TRÊS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA. 126
FIGURA 4.28 - PERDA DE MASSA COMBINADA (RODA E TRILHO) PARA CADA VIDA EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE ESCORREGAMENTO (0,5%, 1%, 2%, 3% E 5%). 127
FIGURA 4.29 – COEFICIENTE DE ATRITO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS PARA OS CINCO ESCORREGAMENTOS (*CREEP*). 1° VIDA DA RODA FERROVIÁRIA. A) PRIMEIRAS RÉPLICAS B) SEGUNDAS RÉPLICAS.....128
FIGURA 4.30 - COEFICIENTE DE ATRITO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS PARA OS CINCO ESCORREGAMENTOS (*CREEP*). 2° VIDA DA RODA FERROVIÁRIA. A) PRIMEIRAS RÉPLICAS B) SEGUNDAS RÉPLICAS.....129
FIGURA 4.31 - COEFICIENTE DE ATRITO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS PARA OS CINCO ESCORREGAMENTOS (*CREEP*). 3° VIDA DA RODA FERROVIÁRIA. A) PRIMEIRAS RÉPLICAS B) SEGUNDAS RÉPLICAS.....130
FIGURA 4.32 - CURVA DE CARTER: VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO MÉDIO EM FUNÇÃO DA % DE ESCORREGAMENTO PARA AS TRÊS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA EM ENSAIOS DISCO CONTRA DISCO. 132
FIGURA 4.33 – RELAÇÃO TEÓRICA ENTRE ESCORREGAMENTO E FORÇA DE ATRITO.....133
FIGURA 4.34 – PARÂMETRO T-GAMMA EM FUNÇÃO DA TAXA DE DESGASTE PARA AVALIZAÇÃO DO REGIME DE DESGASTE PARA ENSAIOS TRIBOLÓGICOS DISCO CONTRA DISCO COM ESCORREGAMENTO VARIÁVEL. 134
FIGURA 4.35 - ASPECTO DA SUPERFÍCIE DOS DISCOS DE RODA E TRILHO APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE POR ROLAMENTO COM 5% DE ESCORREGAMENTO PARA CADA VIDA DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA. 135

FIGURA 4.36 – ASPECTO DA SUPERFÍCIE DE DESGASTE DA 1° VIDA DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA APÓS ENSAIO DE DESGASTE POR ROLAMENTO DE CONFIGURAÇÃO DISCO CONTRA DISCO COM 5% DE ESCORREGAMENTO. A) SE – 1.000X B) BSC – 1.000X. SEM ATAQUE. (MEV-FEG) (PMT-USP). 136
FIGURA 4.37 - ASPECTO DA SUPERFÍCIE DE DESGASTE DA 2° VIDA DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA APÓS ENSAIO DE DESGASTE POR ROLAMENTO DE CONFIGURAÇÃO DISCO CONTRA DISCO COM 5% DE ESCORREGAMENTO. A) SE – 1.000X B) BSC – 1.000X. SEM ATAQUE. (MEV-FEG) (PMT-USP). 137
FIGURA 4.38 - ASPECTO DA SUPERFÍCIE DE DESGASTE DA 3° VIDA DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA APÓS ENSAIO DE DESGASTE POR ROLAMENTO DE CONFIGURAÇÃO DISCO CONTRA DISCO COM 5% DE ESCORREGAMENTO. A) SE – 1.000X B) BSC – 1.000X. SEM ATAQUE. (MEV-FEG) (PMT-USP). 138
FIGURA 4.39 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO DISCO DE MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA FUNDIDA PROVENIENTE DO ENSAIO DISCO-DISCO PARA 1° VIDA COM 5% DE ESCORREGAMENTO. A) SE - 500X B) SE - 10.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP)..... 139
FIGURA 4.40 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO DISCO DE MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA FUNDIDA PROVENIENTE DO ENSAIO DISCO-DISCO PARA 2° VIDA COM 5% DE ESCORREGAMENTO. A) SE - 500X B) SE - 10.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP)..... 140
FIGURA 4.41 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO DISCO DE MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA FUNDIDA PROVENIENTE DO ENSAIO DISCO-DISCO PARA 3° VIDA COM 5% DE ESCORREGAMENTO. A) SE - 500X B) SE - 10.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP)..... 141
FIGURA 4.42 – COMPRIMENTO E ÂNGULO DE ABERTURA DE TRINCAS EM FUNÇÃO DA MICROESTRUTURA APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE POR ROLAMENTO COM 5% DE ESCORREGAMENTO PARA MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA. 142
FIGURA 4.43 - VARIAÇÃO DA MICRODUREZA DOS DISCOS DE RODA FERROVIÁRIA EM SUAS MÚLTIPLAS VIDAS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DESDE A SUPERFÍCIE DE CONTATO APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE POR ROLAMENTO COM 5% DE ESCORREGAMENTO. 143
FIGURA 4.44 - ASPECTO DA SUPERFÍCIE DE DESGASTE DA 1° VIDA DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA APÓS ENSAIO DE RCF. A) SE - 150X B) BSC - 150X C) SE – 1.000X D) BSC - 1.000X E) DETALHE DAS TRINCAS. SEM ATAQUE. (MEV-FEG) (PMT-USP). 147

FIGURA 4.45 - ASPECTO DA SUPERFÍCIE DE DESGASTE DA 2° VIDA DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA APÓS ENSAIO DE RCF. A) SE - 150X B) BSC - 150X C) SE – 1.000X D) BSC - 1.000X E) DETALHE DAS TRINCAS. SEM ATAQUE. (MEV-FEG) (PMT-USP). 148
FIGURA 4.46 - ASPECTO DA SUPERFÍCIE DE DESGASTE DA 3° VIDA DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA APÓS ENSAIO DE RCF. A) SE - 150X B) BSC - 150X C) SE – 1.000X D) BSC - 1.000X E) DETALHE DAS TRINCAS. SEM ATAQUE. (MEV-FEG) (PMT-USP). 149
FIGURA 4.47 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO DISCO MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA FUNDIDA PROVENIENTE DO ENSAIO DE RCF PARA 1° VIDA. A) SE - 500X B) SE - 5.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 150
FIGURA 4.48 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO DISCO MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA FUNDIDA PROVENIENTE DO ENSAIO DE RCF PARA 2° VIDA. A) SE - 500X B) SE - 5.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 151
FIGURA 4.49 - ASPECTO DA MICROESTRUTURA ENCONTRADA NA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO DISCO MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA FUNDIDA PROVENIENTE DO ENSAIO DE RCF PARA 3° VIDA. A) SE - 500X B) SE - 5.000X. ATAQUE NITAL 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP). 152
FIGURA 4.50 – COMPRIMENTO MÉDIO E PROFUNDIDADE MÁXIMA DAS TRINCAS EM FUNÇÃO DA MICROESTRUTURA APÓS OS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA DE CONTATO POR ROLAMENTO. 153
FIGURA 4.51 - VARIAÇÃO DA MICRODUREZA DOS DISCOS DE RODA FERROVIÁRIA EM SUAS MÚLTIPLAS VIDAS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DESDE A SUPERFÍCIE DE CONTATO APÓS OS ENSAIOS DE RCF DO TIPO DISCO CONTRA DISCO. 154

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DAS RODAS FERROVIÁRIAS QUANTO À CLASSE, TEOR DE CARBONO [%P] E DUREZA [HB] SEGUNDOS DAS NORMAS AAR M-107/M-208, EN 13262 E JIS E5402-1. 35
TABELA 2.2 – CARACTERÍSTICAS RECOMENDADAS DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE RODAS FERROVIÁRIAS SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO NORMATIVA AAR M-107/M-208. 36
TABELA 3.1 - TRATAMENTOS TÉRMICOS AOS QUAIS OS PINOS DE AÇO 1080 FORAM SUBMETIDOS ANTES DOS ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO PURO (LTF-USP). ..64
TABELA 3.2 - PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO COM CADA ETAPA UTILIZADA NO EQUIPAMENTO PLINT TE-79. 68
TABELA 3.3 - PARÂMETROS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE DESGASTE A SECO DO TIPO PINO CONTRA DISCO. 69
TABELA 3.4 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOTRAS DE PINO E DISCOS UTILIZADAS NOS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO PARA UM MATERIAL MODELO. 70
TABELA 3.5 - DUREZA E MICROESTRUTURA DOS PINOS DE MATERIAL MODELO E DISCOS DE H13. 71
TABELA 3.6 - PERDA DE MASSA DOS PINOS APÓS ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO PURO. 77
TABELA 3.7 – TAXA DE DESGASTE E COEFICIENTE DE DESGASTE K_A EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO ISOTÉRMICO PARA OS PINOS DE MATERIAL MODELO PROVENIENTES DOS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO. 79
TABELA 3.8 – MÉDIA DO COEFICIENTE DE ATRITO EM FUNÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO DOS PINOS APÓS O PERÍODO DE *RUNNING-IN* (APROXIMADAMENTE 300 METROS DE DESLIZAMENTO) NOS ENSAIOS DE DESGASTE PINO CONTRA DISCO. 82
TABELA 3.9 – VALORES NORMALIZADOS DE PRESSÃO, VELOCIDADE E TAXA DE DESGASTE PARA OS ENSAIOS DE DESGASTE COM CONFIGURAÇÃO PINO CONTRA DISCO PARA O MATERIAL MODELO. 84
TABELA 3.10 – VARIAÇÃO DA MICRODUREZA DOS PINOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DESDE A SUPERFÍCIE DE CONTATO COM O DISCO. 89
TABELA 3.11 – RESULTADOS CONSOLIDADOS DOS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO COM PINOS DE MATERIAL MODELO CONTRA DISCOS DE AÇO H13. 90

TABELA 4.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS DE RODA FERROVIÁRIA UTILIZADAS NOS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO: MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA. 94
TABELA 4.2 – DUREZA E MICROESTRUTURA DOS PINOS DE MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA E DISCOS DE AÇO H13. 98
TABELA 4.3 - PERDA DE MASSA DOS PINOS E DISCOS APÓS ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO DAS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA.....99
TABELA 4.4 - COEFICIENTE DE DESGASTE K_A EM FUNÇÃO DAS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA. 101
TABELA 4.5 – VALORES NORMALIZADOS DE PRESSÃO, VELOCIDADE E TAXA DE DESGASTE PARA OS ENSAIOS DE DESGASTE COM CONFIGURAÇÃO PINO CONTRA DISCO PARA AS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA FUNDIDA MICROLIGADA. 102
TABELA 4.6 – COEFICIENTE DE ATRITO EM FUNÇÃO DAS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA APÓS O PERÍODO DE *RUNNING-IN* NOS ENSAIOS DE DESGASTE PINO CONTRA DISCO 105
TABELA 4.7 – VARIAÇÃO DA MICRODUREZA DOS PINOS DE MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DESDE A SUPERFÍCIE DE CONTATO COM O DISCO.112
TABELA 4.8 - RESULTADOS CONSOLIDADOS DOS ENSAIOS PINO CONTRA DISCO COM PINOS DE MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA MICROLIGADA CONTRA DISCOS DE AÇO H13. 112
TABELA 4.9 – PARÂMETROS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE DESGASTE POR ROLAMENTO COM DIFERENTES ESCORREGAMENTOS. 121
TABELA 4.10 – PARÂMETROS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA DE CONTATO POR ROLAMENTO DO TIPO DISCO CONTRA DISCO. 123
TABELA 4.11 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DISCO CONTRA DISCO: MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA. 124
TABELA 4.12 – COEFICIENTE DE ATRITO PARA AS MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA EM FUNÇÃO DA % DE ESCORREGAMENTO PARA OS ENSAIOS DO TIPO DISCO CONTRA DISCO E PINO CONTRA DISCO. 131
TABELA 4.13 – ESTUDO DA MORFOLOGIA DE TRINCAS ENCONTRADAS NAS IMAGENS DA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE POR ROLAMENTO COM 5% DE ESCORREGAMENTO PARA MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA. 142
TABELA 4.14 – VARIAÇÃO DA MICRODUREZA DOS DISCOS DE MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DESDE A SUPERFÍCIE DE CONTATO APÓS OS ENSAIOS DE DESGASTE POR ROLAMENTO COM 5% DE ESCORREGAMENTO. 144

TABELA 4.15 - RESULTADOS CONSOLIDADOS DOS ENSAIOS DE DESGASTE POR ROLAMENTO COM DIFERENTES PORCENTAGENS DE ESCORREGAMENTO DO TIPO DISCO CONTRA DISCO PARA MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA. 144
TABELA 4.16 – NÚMERO DE CICLOS NECESSÁRIOS PARA INÍCIO DE *SHELLING*. RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA DE CONTATO UTILIZANDO UM TRIBÔMETRO DO TIPO DISCO CONTRA DISCO. 146
TABELA 4.17 – ESTUDO DA MORFOLOGIA DE TRINCAS ENCONTRADAS NAS IMAGENS DA SEÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE APÓS OS ENSAIOS DE FADIGA DE CONTATO POR ROLAMENTO PARA MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA. 153
TABELA 4.18 – VARIAÇÃO DA MICRODUREZA DOS DISCOS DE MATERIAL DE RODA FERROVIÁRIA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DESDE A SUPERFÍCIE DE CONTATO APÓS OS ENSAIOS DE RCF DO TIPO DISCO CONTRA DISCO. 155
TABELA 4.19 - RESULTADOS CONSOLIDADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA POR ROLAMENTO DO TIPO DISCO CONTRA DISCO PARA MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA. 155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LTF	Laboratório de Transformações de Fases (USP)
PMT	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (USP)
USP	Universidade de São Paulo
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície (USP)
PME	Departamento de Engenharia Mecânica (USP)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ITV	Instituto Tecnológico Vale
FDTE	Fundação Para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
RCF	Fadiga de contato por rolamento (*Rolling Contact Fatigue*)
AAR	*Association of American Railroad*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
ANTF	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
EFC	Estrada de Ferro - Carajás
EFVM	Estrada de Ferro - Vitória a Minas
TKU	Tonelada Quilômetro Útil Transportada
ABIFER	Associação Brasileira da Indústria Ferroviária
EN	*European Standards*
JIS	*Japanese Industrial Standards*
IIW	*International Institute of Welding*
SE	Elétrons secundários (*secondary electrons*)
BSC	Elétrons retroespalhados (*backscattered electrons*),
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
FEG	Canhão de emissão de campo (*field emission gun*)
COF	Coeficiente de atrito
ANOVA	Análise de variância
GTS	Grupo de Tribologia e Superfícies da Universidade Nacional da Colômbia
AREMA	*American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association*

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Newton
m/s	Metro por segundo
Pa	Pascal
km	Quilômetro
m	Metro
%p	Porcentagem de peso
HB	Dureza Brinell
°C	Grau Celsius
µm	Micrômetro
Q_A	Volume de massa perdida em um ensaio de deslizamento puro
K_A	Coeficiente de desgaste adimensional (coeficiente de Archard)
W_A	Carga normal
d	Distância de deslizamento
H_A	Dureza do material mais mole (desgaste por deslizamento)
T_1	Transição do regime de desgaste moderado para severo (desgaste por deslizamento)
T_2	Transição do regime de desgaste severo para moderado (desgaste por deslizamento)
g	Grama
$\tilde{V}$	Velocidade normalizada
v	Velocidade de deslizamento
a_c	Raio da área de contato
k	Difusividade térmica
$\tilde{P}$	Pressão normalizada
P	Pressão de contato
H	Dureza
$\tilde{Q}$	Taxa de desgaste normalizada
Q	Taxa de desgaste
μ_0	Coeficiente de atrito inicial
$\mu_{máx}$	Coeficiente de atrito máximo
μ_{SS}	Coeficiente de atrito no regime permanente (*steady state*)

μ	Coeficiente de atrito
HV	Dureza Vickers
mg	Miligrama
P_0	Pressão máxima de contato de Hertz
HRC	Dureza Rockwell C
T	Força tangencial
γ	Escorregamento (*creepage*)
A	Área de contato
Ø	Diâmetro
A_{c1}	Temperatura de início da transformação austenítica no aquecimento
A_{Cm}	Temperatura de final da transformação austenítica no aquecimento
M_s	Temperatura de início da transformação martensítica
s	Segundo
CE	Carbono equivalente
C	Carbono
Mn	Manganês
Ni	Níquel
Cu	Cobre
Cr	Cromo
Mo	Molibdênio
V	Vanádio
ml	Mililitro
eV	Elétron-volt
rpm	Rotação por minuto
mm	Milímetro
Ft	Força de atrito
F	Força normal (carga)
μ	Coeficiente de atrito
P	Perlita
B	Bainita
BR	Bainita revenida
MR	Martensita revenida
S_0	Espaçamento interlamelar perlítico
Nb	Nióbio

MA	Martensita-austenita
HP	Cavalo-vapor
R_R	Raio do disco com maior velocidade
R_T	Raio do disco com menor velocidade
N_R	Rotação do disco com maior velocidade
N_T	Rotação do disco com menor velocidade
D(%)	Escorregamento
L	Comprimento de contato
a	Semi-largura de contato
R_x	Raio equivalente
R_1	Raio do disco 1
R_2	Raio do disco 2
E^*	Módulo de Young equivalente
E_1	Módulo de Young do material do disco 1
v_1	Coeficiente de Poisson do material do disco 1
E_2	Módulo de Young do material do disco 2
v_2	Coeficiente de Poisson do material do disco 2
P_0	Pressão máxima de Hertz
h	Hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 25

1.1 OBJETIVOS 26

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO 27

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 28

2.1 A INDÚSTRIA FERROVIÁRIA 28

2.1.1 Rodas ferroviárias 32

2.1.2 Características microestruturais das rodas ferroviárias 37

2.1.2.1 Microestrutura perlítica 37

2.1.2.2 Microestrutura bainítica 38

2.1.2.3 Microestrutura martensítica 39

2.1.3 Defeitos em rodas ferroviárias 40

2.2 TRIBOLOGIA 42

2.2.1 Desgaste por deslizamento (*sliding wear*) 44

2.2.2 RCF (*rolling-contact fatigue*) 51

2.2.2.1 Shakedown 52

2.2.3 Tribologia aplicada no sistema roda-trilho 55

2.2.3.1 Regimes de desgaste no contato roda-trilho 58

3 ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR DESLIZAMENTO PURO 60

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS 60

3.1.1 Amostras 61

3.1.2 Composição química e carbono equivalente 64

3.1.3 Ensaios de desgaste por deslizamento 66

3.1.3.1 Caracterização da superfície deformada 69

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES 70

3.2.1 Composição química e carbono equivalente 70

3.2.2 Caracterização microestrutural 71

3.2.3 Ensaios de desgaste por deslizamento puro 77

4 MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA 91

4.1 DESLIZAMENTO PURO 91

4.1.1 Materiais e métodos 91

4.1.1.1 Amostras.....92

4.1.1.2 Ensaios de desgaste por deslizamento puro 93

4.1.2 Resultados e discussões 93

4.1.2.1 Composição química e carbono equivalente 93

4.1.2.2 Caracterização microestrutural 94

4.1.2.3 Ensaios de desgaste por deslizamento 98

4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ROLAMENTO E DE FADIGA DE CONTATO POR ROLAMENTO 114

4.2.1 Materiais e métodos 114

4.2.1.1 Amostras.....115

4.2.1.2 Ensaios tribológicos 117

4.2.1.2.1 Ensaios de desgaste por rolamento 121

4.2.1.2.2 Ensaios de resistência a RCF (fadiga de contato por rolamento).....122

4.2.1.2.3 Caracterização das amostras após os ensaios disco-disco 123

4.2.2 Resultados e discussões 124

4.2.2.1 Composição química e carbono equivalente 124

4.2.2.2 Caracterização microestrutural 124

4.2.2.3 Desgaste por rolamento.....125

4.2.2.4 Resistência à fadiga de contato por rolamento - RCF 145

5 CONCLUSÕES..... 157

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 159

REFERÊNCIAS..... 160

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de transporte eficiente de mercadorias é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico de qualquer país. Dentre os meios de transporte o ferroviário se destaca por sua alta capacidade de carga, especialmente quando é necessário percorrer longas distâncias. Além disso, quando comparado ao transporte rodoviário, o transporte ferroviário é mais seguro e tem menor impacto ambiental tanto na etapa de instalação de sua infraestrutura quanto na etapa de operação principalmente no que se refere à emissão de poluentes.

O transporte ferroviário no Brasil e também no mundo movimenta sobretudo produtos de baixo e médio valor agregado (produtos agrícolas, minérios, combustíveis e produtos industrializados de menor valor). Nesses produtos o custo de frete corresponde a uma parcela significativa do preço final (CNT, 2019).

O Brasil ainda carece de investimentos em infraestrutura ferroviária para atender a demanda crescente por transporte de cargas. O mercado globalizado e competitivo e a inconstância do preço dos combustíveis têm suscitado a busca pelo aumento da eficiência do transporte ferroviário existente.

Nesse contexto, a melhoria no desempenho das rodas ferroviárias é estratégica. Dentre os maiores desafios da indústria ferroviária estão o aumento da vida útil e uma maior capacidade de carga aplicada nas rodas sem reduzir a confiabilidade. Compreender o contato roda-trilho é uma das premissas para atingir esses objetivos. O estudo do contato roda-trilho pode ser realizado a partir de ensaios em laboratórios que geralmente são mais rápidos e menos custosos que análises de campo.

Tradicionalmente as rodas e trilhos ferroviários são fabricados em aços com microestruturas perlíticas, porém desde a década de 80 verifica-se que diversos estudos comparativos de desempenho utilizando aços com outras microestruturas vêm sendo realizados com o intuito de aumentar o desempenho desses componentes ferroviários e encontrar novas soluções. Estudos comparativos para avaliação da resistência ao desgaste de aços perlíticos e bainiticos ainda são necessários e contribuirão para validar essa tendência do setor ferroviário.

O estudo realizado nesse trabalho faz parte do projeto denominado “Estudo Metalúrgico de Rodas e Trilhos Ferroviários: Análise, Microestruturas, Propostas de Melhoria” coordenado pelo Prof. Dr. Hélio Goldenstein e pertencente à Cátedra de Pesquisa Contato Roda-Trilho. O objetivo da Cátedra Roda-Trilho é unir conhecimentos de diversas universidades e centros de pesquisa e guiar novos estudos para o desenvolvimento da indústria ferroviária nacional.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é avaliar a resistência das rodas ferroviárias microligadas fundidas ao desgaste por deslizamento puro, por rolamento e a resistência à fadiga de contato por rolamento em diferentes regiões do aro correspondentes às suas múltiplas vidas.

O objetivo principal desdobra-se nos seguintes objetivos específicos e atividades complementares:

a) com base num modelo de resfriamento isotérmico, avaliar diferentes microestruturas obtidas por meio de tratamentos térmicos, realizados num dilatômetro, quanto ao seu comportamento de desgaste por deslizamento puro (tribômetro pino contra disco);

b) identificar e caracterizar as microestruturas encontradas numa roda ferroviária AAR M208 Classe D nas regiões do aro correspondentes às suas múltiplas vidas;

c) realizar ensaios tribológicos pino contra disco em amostras de três diferentes regiões do aro da roda ferroviária simulando suas múltiplas vidas (pinos de material de roda contra discos de aço H13, carga de 10,38 N, velocidade de deslizamento 0,5 m/s e duração do ensaio de 3.600 segundos);

d) executar ensaios tribológicos disco contra disco para comparar a resistência ao desgaste por rolamento das múltiplas vidas de uma roda com diferentes escorregamentos e elaborar uma curva de Carter (disco de material de roda contra disco de material de trilho, carga de 1,1 GPa, escorregamentos de 0,5% até 5% e 8.000 ciclos);

e) realizar ensaios tribológicos disco contra disco objetivando identificar a fadiga de contato por rolamento (RCF) nas múltiplas vidas de uma roda ferroviária (discos de material de roda, carga de 1,1 GPa, escorregamento 0,3% e 250.000 ciclos).

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 6 capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, os objetivos e a estrutura do trabalho. No Capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica pertinente ao tema, estruturada em duas seções. Inicia-se com a história da indústria ferroviária, uma descrição dos principais aspectos das rodas ferroviárias, os pontos mais relevantes das normas da indústria ferroviária para o desenvolvimento do trabalho e os principais defeitos encontrados nas rodas ferroviárias. Na segunda seção são abordados os conceitos gerais de tribologia e apresentados o desgaste por deslizamento e a fadiga de contato por rolamento, mecanismos de degaste típicos de rodas ferroviárias, além de algumas particularidades sobre a aplicação desse tema nas análises do sistema roda-trilho.

O Capítulo 3 apresenta um estudo sobre a resistência ao desgaste por deslizamento puro em função das diversas microestruturas encontradas em rodas ferroviárias convencionais e microligadas. Os ensaios foram realizados num tribômetro de configuração pino- disco, para os pinos foi utilizado o aço ASTM 1080 com diferentes microestruturas obtidas por tratamentos isotérmicos e para os discos aço ASTM H13.

Em seguida, no Capítulo 4, são avaliadas as múltiplas vidas de uma roda ferroviária fundida microligada, fabricada segundo a norma AAR M-107/M-208 classe D, quanto à resistência ao desgaste por deslizamento puro, por rolamento e quanto à resistência à fadiga de contato por rolamento. Foram realizados ensaios em tribômetros de configuração pino-disco e disco-disco.

As principais conclusões apresentadas no final de cada capítulo são consolidadas no Capítulo 5 e o Capítulo 6 aborda as sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas em formato de lista as referências utilizadas no desenvolvimento do texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo de revisão bibliográfica está divido em duas seções principais: a indústria ferroviária e tribologia. Na primeira seção serão apresentados dados históricos sobre a indústria ferroviária, detalhes sobre o transporte ferroviário brasileiro, características microestruturais das rodas ferroviárias e destaques das principais normas utilizadas. Na segunda seção, serão introduzidos os principais conceitos de tribologia, um detalhamento sobre o desgaste por deslizamento e sobre a fadiga de contato por rolamento e, por fim, serão abordados detalhes sobre a tribologia aplicada a análise do sistema roda-trilho, os principais defeitos encontrados em rodas ferroviárias e os regimes de desgaste no contato roda-trilho.

2.1 A INDÚSTRIA FERROVIÁRIA

Mesmo sendo um país com grandes distâncias entre os centros produtores, comerciais e exportadores e com uma topografia predominantemente de planaltos e planícies, o Brasil não apresenta uma malha ferroviária tão desenvolvida quanto outros países em condições semelhantes (China, Estados Unidos e Rússia). A indústria ferroviária aliada com os operadores de carga e centros de pesquisa em universidades vêm trabalhando no âmbito nacional para aumentar a sua competitividade e eficiência, sobretudo no transporte de carga. Nas aplicações ferroviárias para transporte de carga pesada (*heavy haul*) a movimentação de minérios e grãos se destaca no Brasil e se caracteriza por exigir altas cargas e baixas velocidades de transporte.

No século XVII na Inglaterra foram instaladas as primeiras ferrovias do mundo que serviam para transporte de carvão, usavam tração animal e rodas e trilhos de madeira. Os trilhos começaram a ser produzidos de ferro apenas em 1776 e no ano de 1812 foi empregada pela primeira vez a tração por uma locomotiva à vapor (ANTF, 2021).

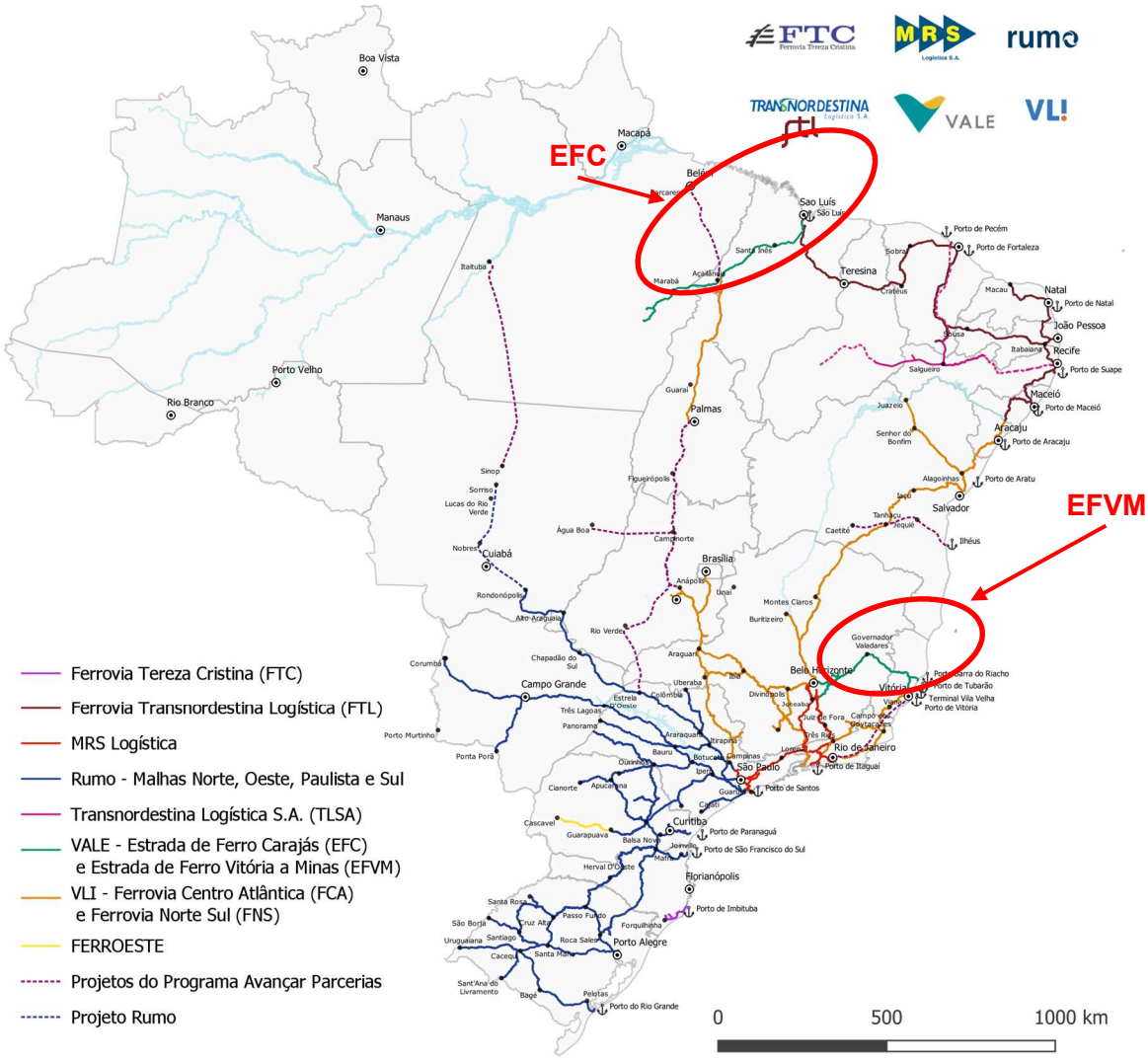
A história ferroviária brasileira se iniciou em 1845 com a inauguração de uma ferrovia no Rio de Janeiro; em 1922 o país já apresentava 29.000 km de ferrovias (ANTF, 2021). Nos dias atuais, o Brasil apresenta 29.320 km de ferrovias para

transporte de carga administradas por empresas afiliadas à Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF) (ANTF, 2021).

A ANTF é uma instituição nacional brasileira sem fins lucrativos que visa o desenvolvimento do transporte ferroviário de carga no país. No mapa da Figura 2.1 são apresentados os traçados dessas ferrovias que conectam os portos brasileiros aos centros de mineração, siderúrgicos, industriais e agrícolas. No mesmo mapa estão destacadas as estradas administradas pela Vale: a Estrada de Ferro Carajás (EFC) e a Estada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) (ANTF, 2021).

Atualmente o transporte ferroviário é responsável por carregar mais de 92% dos minérios e 40% das *commodities* agrícolas até os portos brasileiros para exportação (ANTF, 2021).

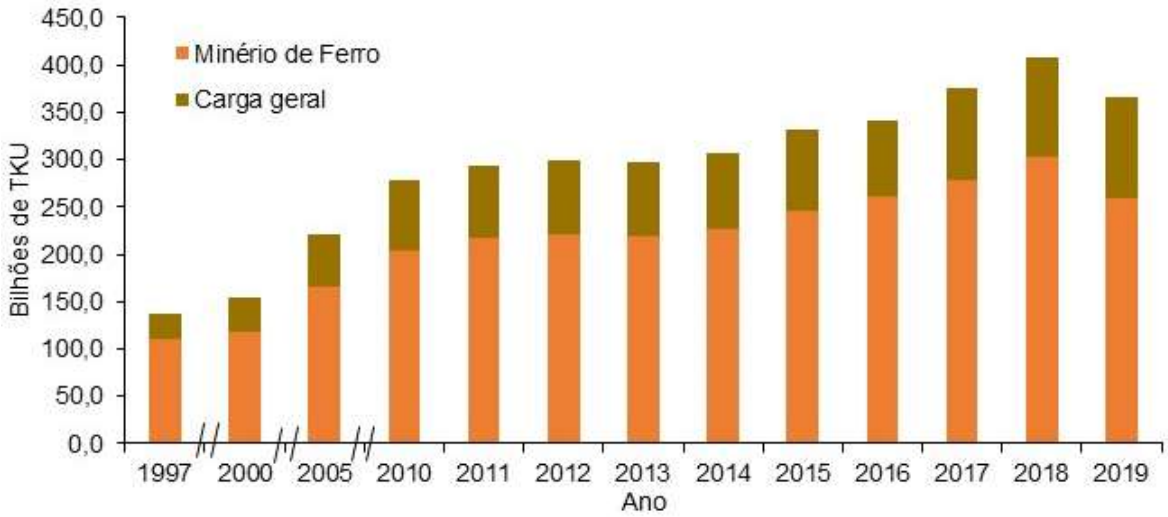
Figura 2.1 - Mapa ferroviário brasileiro das empresas associadas à ANTF.



Fonte: Adaptado de ANTF (2021).

A Figura 2.2 apresenta a evolução do volume de mercadorias transportadas por ferrovias no Brasil de 1997 até 2019 em bilhões de tonelada quilômetro útil transportada (TKU). Nota-se que a quantidade de minério de ferro (*heavy haul*) transportada representa aproximadamente 80% de toda carga transportada por ferrovias nesses últimos anos. Em 2019, pela primeira vez desde 2006, a carga anual total transportada por ferrovias no Brasil teve uma queda de aproximadamente 10%. Segundo a ANTF (2021) essa redução ocorreu devido à interrupção da produção de minério de ferro em algumas regiões brasileiras. Nota-se também que o volume transportado de carga geral aumentou em todo o período apresentado.

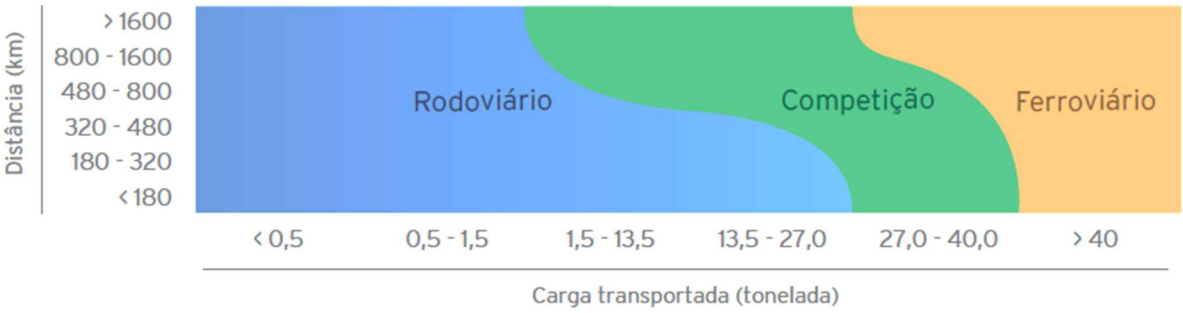
Figura 2.2- Transporte ferroviário anual em bilhões de TKU (tonelada quilômetro útil transportada) por mercadoria no Brasil durante o período de 1997 até 2019.



Fonte: Adaptado de ANTF (2021).

O gráfico da Figura 2.3 apresenta um comparativo entre o transporte rodoviário e ferroviário indicando qual é o mais vantajoso de acordo com a carga transportada e a distância percorrida. Verifica-se que para cargas superiores a 40 toneladas, o transporte ferroviário é sempre mais vantajoso independentemente da distância percorrida (CNT, 2019).

Figura 2.3 - Competição modal no transporte de carga segundo a distância percorrida e a carga transportada.

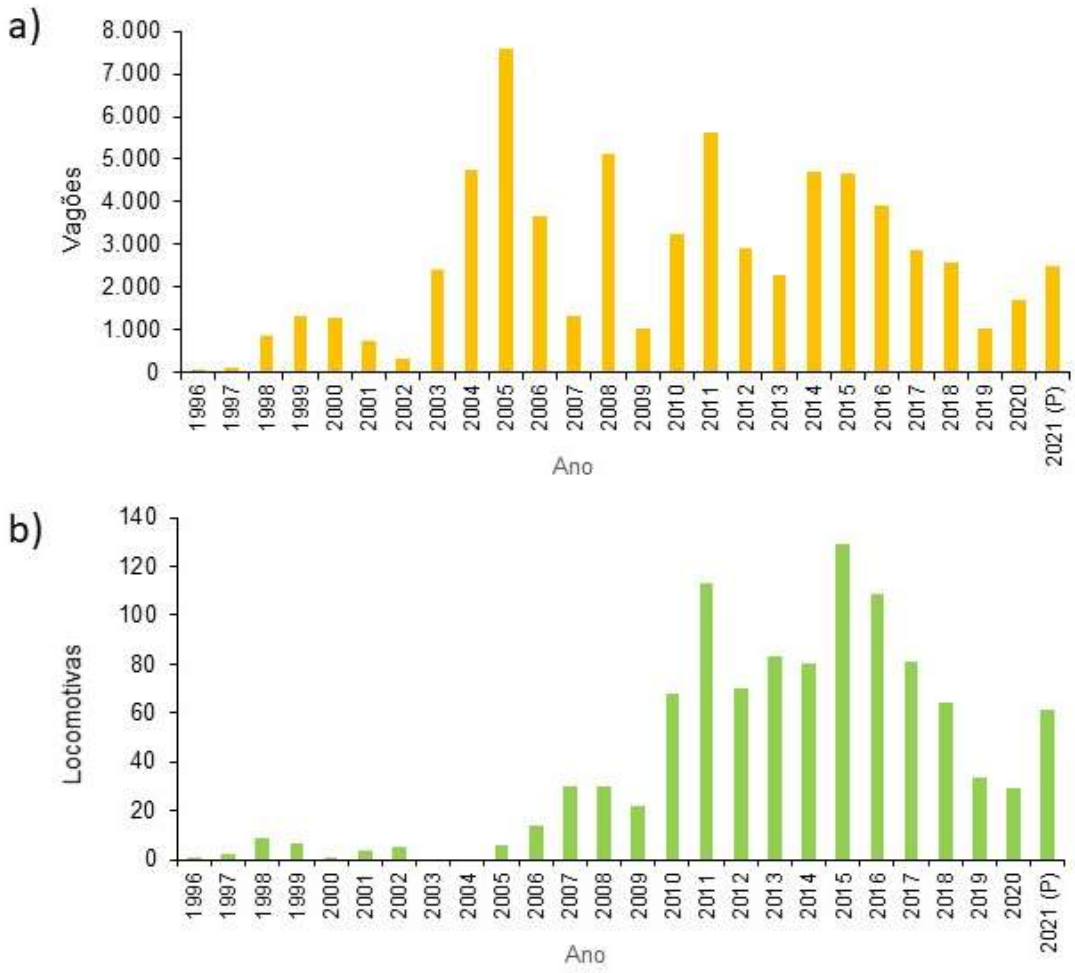


Fonte: Adaptado de CNT (2019).

Outra vantagem do transporte ferroviário é que apesar da infraestrutura de terraplanagem e fundação demandarem altos custos iniciais, a manutenção é baixa e o período de renovação dos trilhos também é relativamente longo, cerca de 40 anos. A locomotiva e os vagões têm vidas úteis estimadas em 18 e 10 anos respectivamente (CNT, 2019).

A Figura 2.4 apresenta a produção anual brasileira de vagões e locomotivas entre os anos de 1996 e 2020 e a previsão para 2021 segundo dados disponibilizados pela Associação Brasileira da Indústria Ferroviária (ABIFER). Observa-se que o volume de produção oscila consideravelmente a cada ano. Em 2019 houve uma queda acentuada na produção de locomotivas (34) e vagões (1.006), porém em 2020 o volume de vagões aumentou (1.672 vagões) e a previsão de produção para 2021 é otimista (61 locomotivas e 2.500 vagões).

Figura 2.4 - Produção brasileira anual de vagões e locomotivas entre os anos de 1996 e 2020 e previsão para 2021. a) vagões e b) locomotivas.

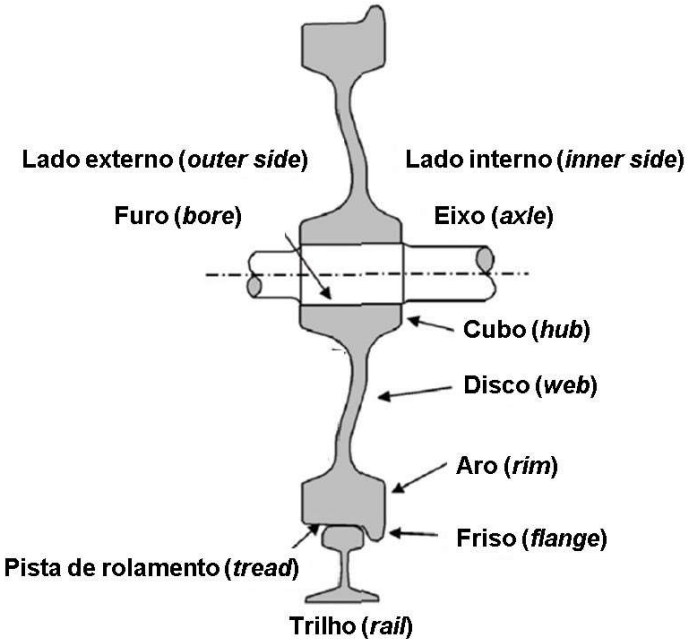


Fonte: Adaptado de ABIFER (2021).

2.1.1 Rodas ferroviárias

As rodas ferroviárias para transporte de carga são fabricadas em aço e conformadas por forjamento ou fundição. Na Figura 2.5 observa-se a nomenclatura das principais regiões de uma roda em português e em inglês. A pista de rolamento e o friso são as regiões que mantém contato com o trilho e que sofrem maior desgaste. A espessura do aro possibilita a reusinagem, que garante o perfil geométrico da pista e do friso e eliminando defeitos superficiais decorrentes do uso. O disco ou alma é o elemento estrutural que liga o aro ao cubo, no cubo é montado o eixo do rodeiro. O rodeiro é composto de um eixo e duas rodas unidas rigidamente por interferência, além de mancais de rolamento e adaptadores para suportar as demais estruturas do vagão ou locomotiva.

Figura 2.5 – Perfil de uma roda ferroviária com a nomenclatura das suas principais regiões em português e em inglês.



Fonte: Adaptado de Okagata (2013).

A conicidade da pista de rolamento produz um raio de rolamento diferente a depender do deslocamento lateral do rodeiro com relação aos trilhos estabelecendo um sistema dinâmico que permite direcionar automaticamente o veículo nas curvas. Entre os pontos de contato de cada roda são produzidas forças longitudinais diferenciadas que tendem a produzir um ângulo de ataque do rodeiro com relação à direção da via férrea criando um efeito restituidor que garante o direcionamento em curvas e também a centralização do rodeiro necessária devido às irregularidades das vias férreas em trajetórias retilíneas (SPINOLA BARBOSA; NETO, 1996).

Os processos de fabricação das rodas ferroviárias são adaptados de forma a atender as normas (AAR, EN, JIS e outras) e os requisitos adicionais dos operadores. Necessariamente a roda ferroviária deve ser fabricada a partir de fundição ou forjamento. Os tratamentos térmicos devem ser rigorosamente controlados para que não ocorram defeitos internos, trincas ou tensões indesejáveis. A região do aro deve ser submetida à têmpera (resfriamento diferencial) e em seguida ao revenimento até que atinja os requisitos de dureza previstos em norma e então resfriada até a temperatura ambiente (AAR M-107/M-208, 2011).

Após esses tratamentos térmicos as rodas são submetidas a um processo de *shot peening* que promove a limpeza superficial da roda além de introduzir tensões residuais compressivas, em seguida são acabadas e submetidas à inspeção final (ultrassom, partículas magnéticas, medição de dureza e avaliação dimensional).

A classificação das rodas ferroviárias utilizada no Brasil é realizada a partir das normas AAR M-107 e M-208 (*Association of American Railroad*) elaboradas nos Estados Unidos. Dentre as outras normas ferroviárias existentes, destacam-se a EN–13262 (*European Standards*) e a JIS E–5402-1 (*Japanese Industrial Standards*), a classificação das rodas ferroviárias quanto à classe, teor de carbono (%p) e dureza (HB) segundo essas instruções normativas pode ser conferida na Tabela 2.1.

Rodas ferroviárias classes C e D da AAR M-107/M-208 são recomendadas para o transporte de cargas *heavy haul* como minérios, carvão ou produtos provenientes da indústria siderúrgica. Estes serviços demandam altas cargas nas rodas e condições leves de frenagem (baixas velocidades). Rodas classes L, A e B são destinadas para transporte de passageiros. As rodas podem ser fabricadas para uma vida (*one-wear*), duas vidas (*two-wear*) ou múltiplas vidas (*multi-wear*).

A norma para rodas ferroviárias AAR M-107/M-208 apresenta os valores máximos e mínimos de dureza aceitáveis no aro (Tabela 2.1), porém não especifica a homogeneidade desses valores na região. Por exemplo, o aro de uma roda pode possuir variações de até 50 HB e ainda assim estará dentro da norma e ser aceita para uso. Já a norma EN-13262 define que a diferença entre os valores máximo e mínimo de dureza no aro para um mesmo lote não pode exceder 30 HB.

Tabela 2.1 - Classificação das rodas ferroviárias quanto à classe, teor de carbono [%p] e dureza [HB] segundos das normas AAR M-107/M-208, EN 13262 e JIS E5402-1.

Norma	Localidade	Classe	Teor de carbono [%p]	Dureza [HB]
AAR M-107 e AAR M-208	América do Norte	Classe L	≤0,47	197-277
		Classe A	0,47-0,57	255-321
		Classe B	0,57-0,67	302-341
		Classe C	0,67-0,77	321-363
		Classe D	0,67-0,77	341-415
EN 13262	Europa	ER6	≤0,48	234-270
		ER7	≤0,52	247-282
		ER8	≤0,56	258-296
		ER9	≤0,60	300-350
JIS E5402-1	Japão	SSW-QS	0,60-0,75	246-307
		SSW-QR	0,60-0,75	311-363
		SSW-QRH	0,60-0,75	295-347

Fonte: Adaptado de Okagata (2013), AAR M-107/M-208 (2011) e EN-13262 (2011).

Na Tabela 2.2 são descritas as características recomendadas quanto à composição química de rodas ferroviárias segundo a classificação normativa AAR M-107/M-208. No transporte de altas cargas e baixas velocidades, nos últimos anos nota-se uma tendência de aplicação da classe D (aço microligado). Essa classe apresenta uma faixa de dureza permitida superior à recomendada para classe C (Tabela 2.1), no entanto ambas as classes possuem as mesmas tolerâncias quanto à concentração dos elementos químicos (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Características recomendadas de composição química de rodas ferroviárias segundo a classificação normativa AAR M-107/M-208.

Elemento químico	Concentração [%p]				
	Classe L	**Classe A**	**Classe B**	**Classe C**	**Classe D**
Carbono	<0,47	0,47-0,57	0,57-0,67	0,67-0,77	0,67-0,77
Manganês	0,60-0,90	0,60-0,90	0,60-0,90	0,60-0,90	0,60-0,90
Fósforo	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030
Enxofre	0,005-0,040	0,005-0,040	0,005-0,040	0,005-0,040	0,005-0,040
Silício	0,15-1,00	0,15-1,00	0,15-1,00	0,15-1,00	0,15-1,00
Níquel	<0,25**	<0,25**	<0,25**	<0,25**	<0,25**
Cromo	<0,25**	<0,25**	<0,25**	<0,25**	<0,25**
Molibdênio	<0,10**	<0,10**	<0,10**	<0,10**	<0,10**
Vanádio	<0,040**	<0,040**	<0,040**	<0,040**	<0,040**

Fonte: Adaptado de AAR M-107/M-208 (2011).

O fabricante pode escolher alterar os limites dos elementos marcados com ** na Tabela 2.2 (níquel, cromo, molibdênio e vanádio) desde que a relação apresentada a seguir seja atendida. Essa relação exige os valores mínimos de elementos de liga para que a roda ferroviária seja considerada microligada (classe D AAR).

$$\begin{aligned} 930 - [570 \times \%carbono] - [80 \times \%manganês] - [20 \times \%silício] \\ - [50 \times \%cromo] - [30 \times \%níquel] \\ - [20 \times \%molibdênio + \%vanádio] > 390 \end{aligned} \quad (1)$$

Fonte: AAR M-107/M-208 (2011).

As rodas ferroviárias para aplicação pesada podem ser fabricadas para ter apenas uma vida, ou seja, não possuir sobrematerial e assim não poder ser reperfilada, ou também para múltiplas vidas. Em geral rodas de múltiplas vidas permitem três ou mais reperfilamentos, sendo que em cada operação é retirado entre 3 e 6 milímetros de espessura de material e é refeita a geometria do friso e da pista. O processo de usinagem deve realizado com as rodas acopladas ao eixo e simultaneamente nas duas rodas. Essa operação pode ser realizada periodicamente ou quando a roda apresentar desgaste acentuado, perda de geometria ou falhas decorrentes do uso (ALVES, 2000).

2.1.2 Características microestruturais das rodas ferroviárias

Aços ferrítico-perlíticos ainda são amplamente utilizados em componentes ferroviários, porém observa-se cada vez mais um aumento da utilização de aços bainíticos principalmente para fabricação de rodas ferroviárias. A dureza superior da bainita revenida quando comparada à perlita revenida é a principal justificativa para essa mudança. O senso comum sugere que quanto maior a dureza do material, maior será a sua resistência ao desgaste.

Os aços utilizados em rodas ferroviárias possuem em geral microestruturas austeníticas em temperaturas acima de 720 °C. No processo de fabricação desses aços, durante o resfriamento desde temperaturas acima de 720 °C, ocorre a decomposição da austenita em outras microestruturas como bainita, ferrita, martensita e perlita. O que promove o crescimento de uma nova fase é a redução da energia livre total do sistema (ZENER, 1945).

A formação preferencial de uma microestrutura depende de diversos fatores como composição química, temperatura de transformação e taxa de resfriamento. Alguns elementos de liga, como o manganês e o níquel por exemplo, quando adicionados aos aços, retardam a formação de perlita e bainita além de diminuírem a temperatura inicial de transformação martensítica.

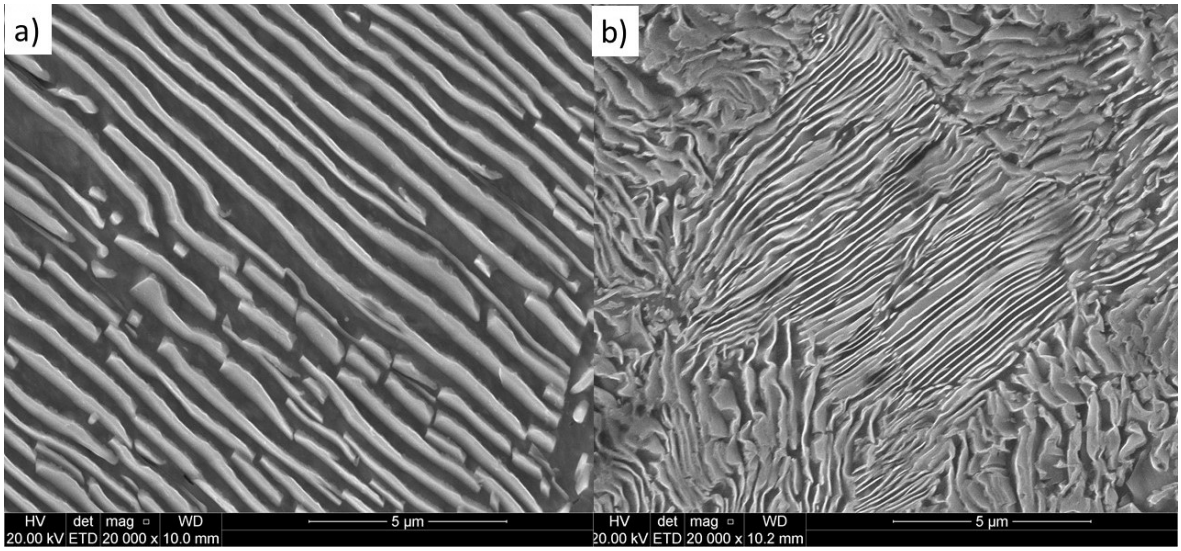
2.1.2.1 Microestrutura perlítica

A perlita é provavelmente a microestrutura mais conhecida em metalografia, ela apresenta uma estrutura lamelar e é formada pelo crescimento cooperativo das fases ferrita e cementita em temperaturas relativamente altas (aproximadamente entre 720 °C e 550 °C) a partir do resfriamento do aço desde a fase austenita. A nucleação da perlita pode ocorrer nos contornos de grão austenítico ou também em inclusões (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

Zener (1945) estudou a decomposição da austenita em perlita e notou que quando a perlita é formada em temperaturas próximas à eutetoide, as lamelas são mais grosseiras e que quanto menor a temperatura de transformação, menor também será o espaçamento interlamelar da perlita, o limite do menor espaçamento possível é determinado termodinamicamente. Essa relação é mostrada na Figura 2.6 por meio de duas imagens de microestruturas perlíticas obtidas a partir do aço

1080 austenitizado a 800 °C durante 5 minutos e tratado isotermicamente a 700 °C e a 600 °C, os espaçamentos interlamelares da perlita encontrados foram 243 nm e 111 nm respectivamente.

Figura 2.6 - Aspecto da microestrutura perlítica encontrada em amostras de aço 1080 tratadas isotermicamente a a) 700°C e b) 600°C. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



Em geral, aços com estrutura perlítica lamelar fina apresentam uma boa relação entre propriedades mecânicas, resistência ao desgaste e propriedades térmicas (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006). Foi observado que quanto menor o espaçamento interlamelar da perlita, maior é a dureza e a resistência ao desgaste do material quando submetido a ensaios tribológicos de deslizamento puro (CHAVES et al., 2020).

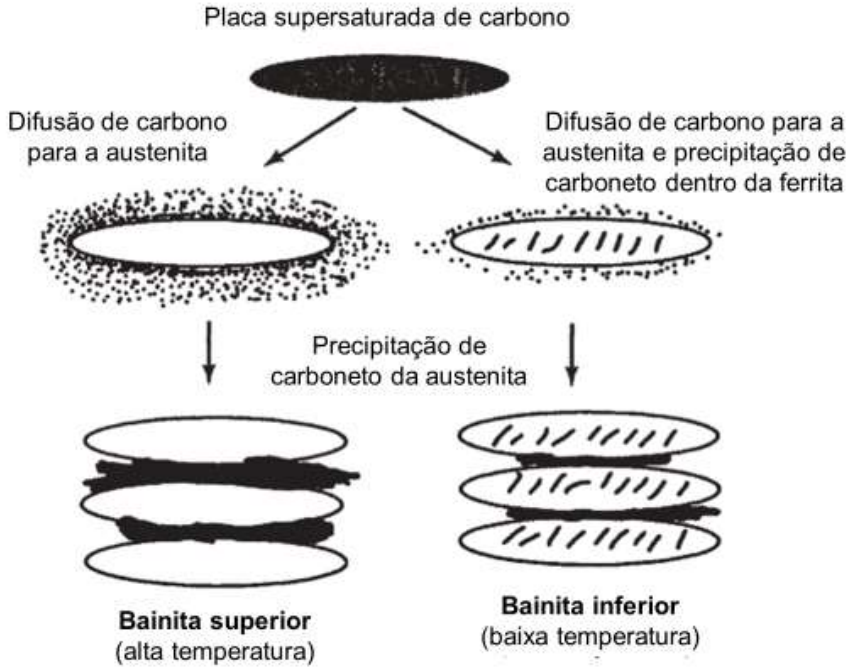
2.1.2.2 Microestrutura bainítica

A bainita pode ser definida como um agregado não lamelar de ferrita e cementita formado em temperaturas intermediárias àquelas utilizadas para formação de perlita e de martensita. A faixa de temperatura de formação varia entre 550 °C e 400 °C para obtenção de bainita superior e entre 400 °C e 250 °C para bainita inferior (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

A microestrutura da bainita superior é formada por finas placas de ferrita com aproximadamente 0,2 µm de espessura e 10 µm de comprimento que crescem dentro de “pacotes”. Em cada “pacote” as placas são separadas por limites com pequena desorientação ou partículas de carbonetos. A microestrutura da bainita

inferior é muito próxima à da bainita superior, no entanto na bainita inferior as partículas de carbonetos também se precipitam dentro das placas de ferrita. Um desenho esquemático da formação desses dois tipos de bainita a partir da austenita é apresentado na Figura 2.7 (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

Figura 2.7 – Representação esquemática da formação da bainita superior e da bainita infeiror a partir da austenita.



Fonte: Adaptado de Bhadeshia e Honeycombe (2006).

Para obter uma microestrutura bainítica nas rodas ferroviárias são adicionados ao aço elementos de liga ou é utilizada uma maior taxa de super-resfriamento na etapa do tratamento térmico. Segundo Minicucci (2019) as rodas podem ser microligadas com a adição de fortes formadores de carbonetos como vanádio, nióbio ou molibdênio. A composição química deve ser rigorosamente controlada para que não ocorra a formação de martensita.

2.1.2.3 Microestrutura martensítica

As transformações de fase para formar bainita e perlita desde a decomposição da austenita são transformações nas quais ocorre a movimentação dos átomos por difusão. Quanto mais rápido a austenita é resfriada, mais difícil é a movimentação dos átomos por difusão e dessa forma pode ocorrer a formação de

martensita a partir da austenita, uma transformação de fase caracterizada por uma mudança da estrutura cristalina. A martensita apresenta uma estrutura acicular em ripas (*laths*) ou placas (*plates*). Normalmente o material com estrutura martensítica é submetido a um tratamento de revenido que tem por finalidade aumentar a ductilidade e reduzir as tensões internas.

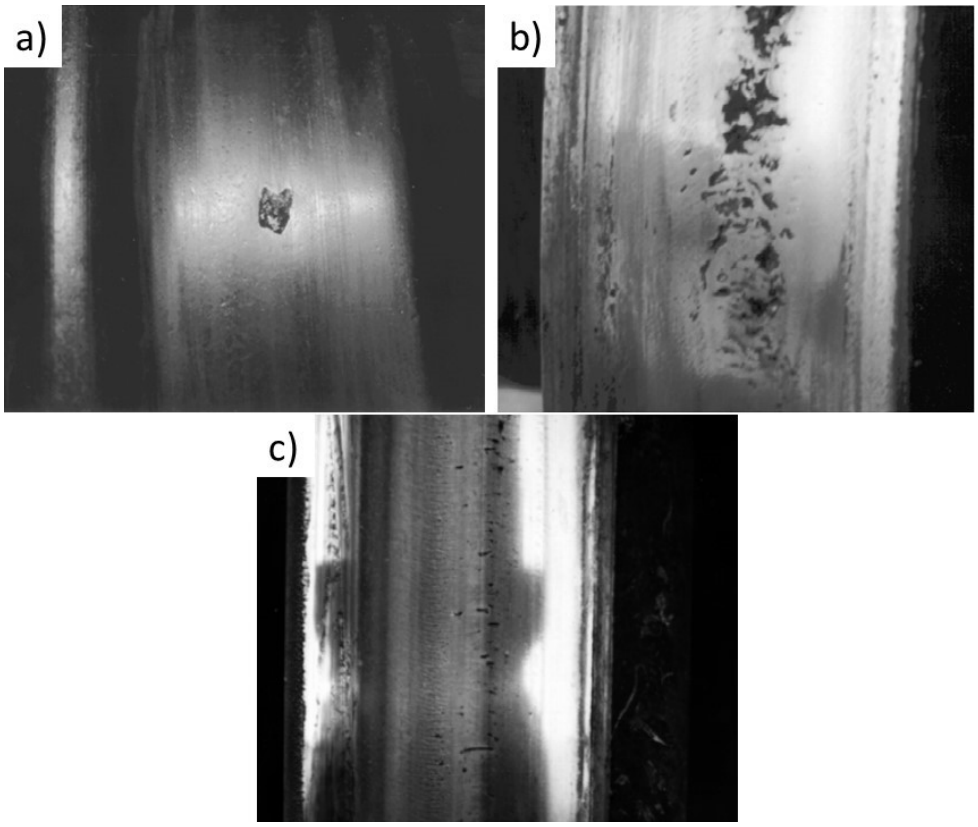
2.1.3 Defeitos em rodas ferroviárias

Os defeitos mais comuns encontrados em rodas ferroviárias são *spalling* (lascamento), *shelling* (escamação), quebra de aro (*shattered rim*), trincas térmicas e calos (ALVES, 2000; FONSECA, 2015).

O *spalling* pode ocorrer quando a roda ferroviária desliza travada sobre o trilho e acontece o aquecimento localizado do material até temperaturas superiores à transição austenítica seguido por um resfriamento abrupto devido às condições ambientais. Assim existe a possibilidade de formação de martensita, microestrutura esta conhecida por apresentar baixa resistência mecânica. Devido às altas tensões residuais e tensões cíclicas aplicadas pode ocorrer a formação de trincas. Essas trincas levam à remoção de material devido ao lascamento (*spalling*). Um ponto único de *spalling* devido ao arrancamento de martensita é mostrado na Figura 2.8(a) (ALVES, 2000; MAGEL; KALOUSEK, 1996).

Defeitos do tipo *shelling* surgem devido à criação e propagação de trincas que promovem o destacamento de material da pista de rolamento da roda pelo efeito da fadiga termomecânica, uma ação combinada de fadiga de contato por rolamento e cargas térmicas. O *shelling* em rodas ferroviárias pode ser identificado em duas fases: na fase inicial são visualizadas pequenas trincas paralelas ao longo de toda a pista de rolamento e na fase final arrancamento de material (Figura 2.8(b)) (ALVES, 2000; MUTTON; EPP; DUDEK, 1991).

Figura 2.8 – Principais defeitos encontrados em rodas ferroviárias. a) ponto único de *spalling* devido à remoção de martensita, b) marcas de *shelling*, c) trincas térmicas com orientação axial.



Fonte: Adaptado de Magel e Kalousek (1996)

Magel e Kalousek (1996) propuseram ainda que o *shelling* aparece quando as condições observadas no sistema ultrapassam o limite de *shakedown*. Esse limite pode ser analisado por meio do diagrama de *shakedown* proposto por Bower e Johnson (1989) e que será apresentado e discutido posteriormente na Figura 2.17.

As trincas térmicas (Figura 2.8(c)) podem levar à fratura das rodas pois se propagam para dentro do material devido à fadiga (cargas cíclicas) e normalmente estão associadas a problemas no freio dos vagões. Elas surgem devido a combinação de tensões térmicas decorrentes de ciclos de aquecimento e resfriamento das rodas. Essas trincas são diferentes das trincas de fadiga termomecânicas (que provocam o *shelling*), as trincas decorrentes de *shelling* se caracterizam por serem finas e longas e na direção da pista de rolamento enquanto as trincas térmicas são sempre orientadas axialmente (ALVES, 2000; MAGEL; KALOUSEK, 1996).

As trincas formadas em regiões próximas à superfície das rodas que levam à perda de material por *spalling*/*shelling* ou trincas térmicas podem também gerar trincas com extensão radial que podem levar à fratura da roda por quebra de aro (*shattered rim*) (ZERBST; MÄDLER; HINTZE, 2005).

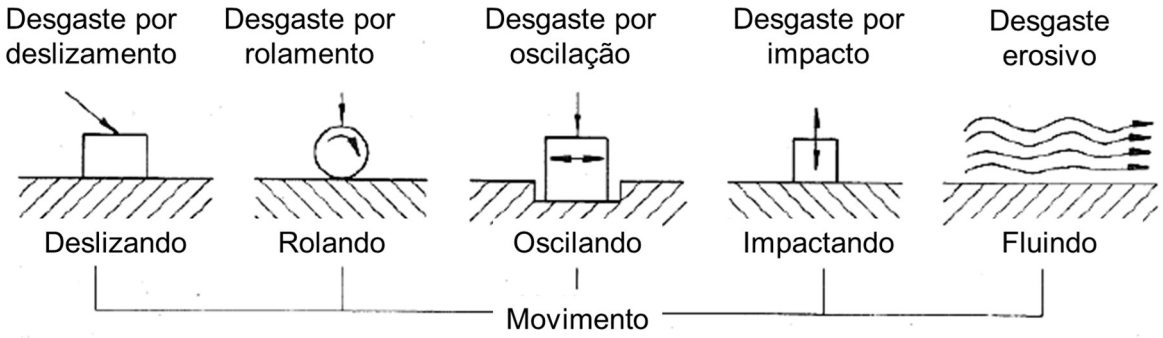
Os defeitos denominados “calos” podem ocorrer quando no contato roda-trilho a temperatura local atinge valores superiores à transição austenítica do aço, a alta deformação plástica localizada no material devido às altas cargas e temperatura fazem com que se forme um “calo”. Geralmente acontece quando a roda desliza travada sobre o trilho devido a um problema no momento da frenagem (ALVES, 2000).

2.2 TRIBOLOGIA

A palavra tribologia tem origem na palavra grega *τριβος* e é definida por Hutchings (1992) como “a ciência e tecnologia da interação das superfícies em movimento relativo abrangendo o estudo do atrito, da lubrificação e do desgaste”. Desgaste é o processo de dano de uma ou mais superfícies e que normalmente apresenta perda progressiva de material, atrito é a resistência ao movimento. Atrito e desgaste são características do tribossistema e sendo assim não são propriedades intrínsecas dos materiais (ZUM GAHR, 1987).

Segundo Zum Gahr (1987), a classificação quanto ao tipo de desgaste pode ser realizada a partir do movimento relativo entre as superfícies ou entre a superfície e o fluxo erosivo. Na Figura 2.9 são observadas as cinco formas de desgaste classificadas quanto à interação entre as superfícies: deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e erosão.

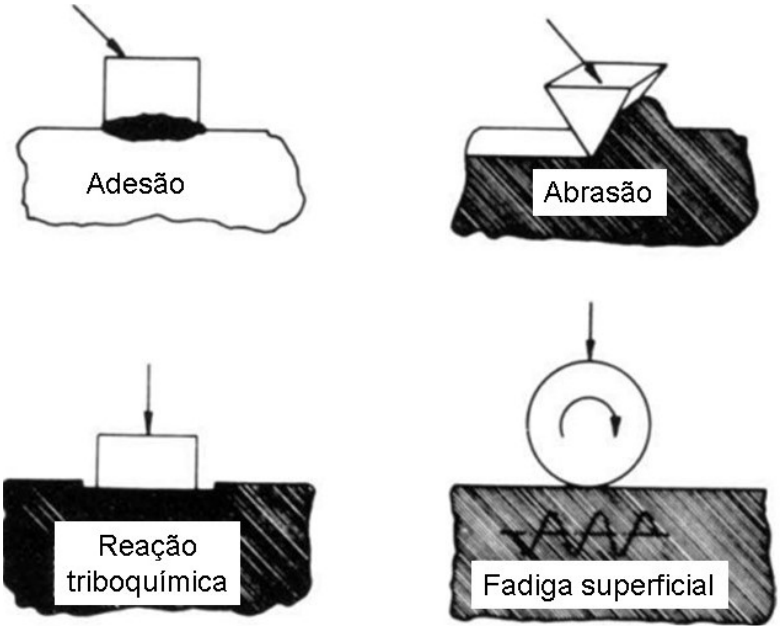
Figura 2.9 - Desenho esquemático da classificação quanto ao tipo de desgaste em função do movimento relativo entre as superfícies.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

Os principais mecanismos de desgaste são classificados como: adesão, abrasão, corrosão (reações triboquímicas) e fadiga superficial. É possível que em um sistema ocorra mais de um mecanismo simultaneamente. Um desenho esquemático com esses quatro principais mecanismos de desgaste é apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Desenho esquemático dos principais mecanismos de desgaste.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

Conforme explicado por Zum Gahr (1987), a adesão pode ocorrer quando as superfícies sólidas deslizam uma sobre a outra e devido às altas pressões locais nas asperezas em contato acontece deformação plástica e formação de junções adesivas interfaciais, essas junções podem então ser quebradas devido ao

deslizamento relativo das superfícies em contato. A abrasão, por sua vez, é a remoção de material por *scratching* (riscamento ou raspagem) provocada pela presença de partículas duras.

O desgaste por reações triboquímicas é caracterizado pela fricção de duas superfícies sólidas que reagem com o ambiente corrosivo que pode ser gasoso ou líquido, o desgaste consiste na contínua remoção e formação de novas camadas sujeitas à reação química. Já a fadiga superficial é a formação de trincas na região da superfície e posterior arrancamento de material devido às tensões cíclicas presentes no tribossistema (ZUM GAHR, 1987).

2.2.1 Desgaste por deslizamento (*sliding wear*)

O desgaste por deslizamento ocorre quando duas superfícies sólidas deslizam uma sobre a outra e ocorre dano em uma ou ambas as superfícies (HUTCHINGS, 1992). Os dois mecanismos principais que atuam no desgaste por deslizamento puro de aços sem lubrificação são o desgaste oxidativo e o desgaste adesivo (ARCHARD; HIRST, 1956).

Para estimar o volume de massa perdida, Archard (1953) definiu a Equação 2 (*Equação de Archard*) que indica o volume de massa perdida em um ensaio de deslizamento puro (**Q_A**) em função do coeficiente de desgaste adimensional (**K_A**), da carga normal (**W_A**), da distância de deslizamento (**d**) e da dureza do material mais mole do par (**H_A**). O coeficiente de desgaste **K_A** é adimensional e menor que uma unidade e estima a severidade do desgaste por deslizamento (HUTCHINGS, 1992). A equação mostra ainda a influência do material (dureza) e da carga aplicada nos ensaios de desgaste por deslizamento.

$$Q_A = K_A \frac{W_A d}{H_A} \qquad (2)$$

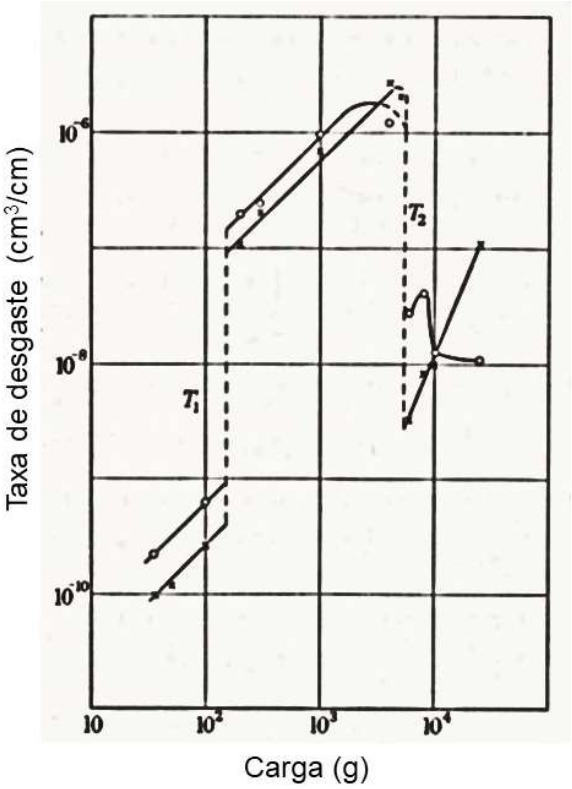
Fonte: Hutchings (1992).

Para Welsh (1965) o desgaste de aços por deslizamento puro sem lubrificação pode ser dividido em dois regimes de desgaste: moderado *(mild wear)* e severo *(severe wear).* O desgaste moderado se caracteriza por apresentar *debris* predominantemente óxidos e finos e reduzida perda de massa. O regime de desgaste severo, por sua vez, exibe uma maior taxa de perda de massa e *debris*

metálicos e com maiores dimensões. A taxa de desgaste do regime severo pode ser mais que duas ordens de grandeza superior em comparação ao regime moderado de desgaste (WELSH, 1965). Hutchings (1992) também considera esses dois regimes e destaca ainda que a superfície de desgaste é mais suave no regime moderado e mais áspera no regime severo e que as partículas no regime moderado têm dimensões entre 0,01 μm e 1 μm enquanto no regime severo as partículas são visíveis até mesmo sem a utilização de equipamentos de amplificação de imagem.

Em seus estudos Welsh (1965) verificou que, para cada aço, o aumento da carga aplicada no sistema (com velocidade de deslizamento constante) provoca a mudança do regime de desgaste da condição moderada para a severa (transição $\mathbf{T_1}$). Além dessa transição, também foi constatada uma segunda carga crítica (transição $\mathbf{T_2}$), na qual o regime passa da condição severa para a moderada novamente. Em ambos os regimes moderados de desgaste foram visualizados *debris* muito pequenos e oxidados além de uma pista de desgaste mais escura com a presença de óxidos aderidos, distintivamente o regime severo apresentou uma pista de desgaste brilhante e *debris* metálicos grosseiros (WELSH, 1965). Na Figura 2.11 são apresentadas as duas transições de regime de desgaste $\mathbf{T_1}$ e $\mathbf{T_2}$ para um ensaio de desgaste de deslizamento puro de configuração pino contra cilindro.

Figura 2.11 – Taxa de desgaste em função da carga para um aço com 0,52%C. Velocidade de deslizamento 100 cm/s. **X** pino e **O** cilindro.



Fonte: Adaptado de Welsh (1965).

Lim e Ashby (1987) construíram mapas de regimes ou de mecanismos de desgaste predominantes para ensaios pino contra disco sem lubrificação utilizando resultados de estudos de diversos autores. A Figura 2.12 apresenta, para ensaios pino contra disco com aço, um mapa dos mecanismos de desgaste predominantes em função da velocidade de deslizamento normalizada e da pressão normalizada.

A velocidade de deslizamento normalizada $\tilde{\mathbf{V}}$ é definida como a relação entre a velocidade de deslizamento **v**, o raio da área de contato nominal $\mathbf{a_c}$ e a difusidade térmica do material **k**:

$$\tilde{V} = \frac{v\, a_c}{k} \qquad (3)$$

A pressão normalizada de contato ($\tilde{\mathbf{P}}$) é a razão entre a pressão de contato nominal (**P**) e a dureza do material (**H**):

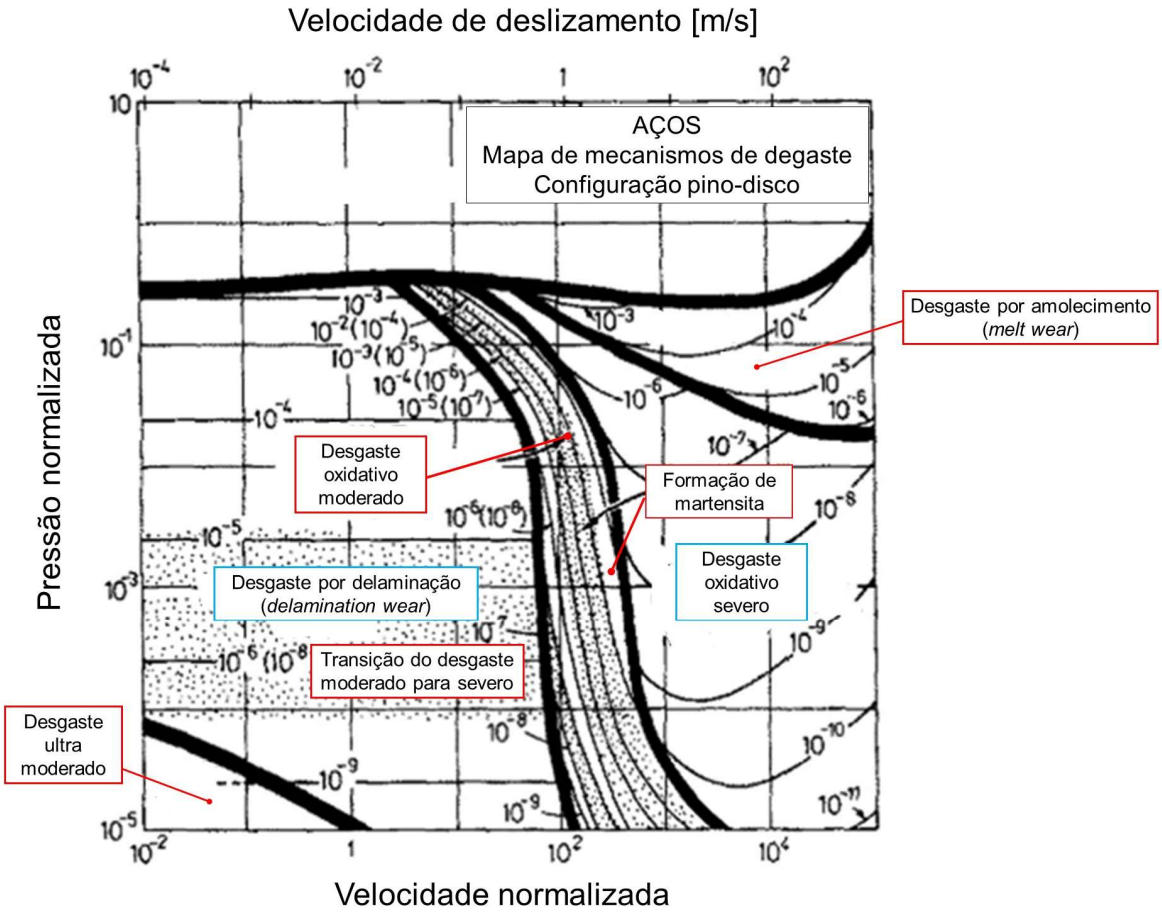
$$\tilde{P} = \frac{P}{H} \qquad (4)$$

São apresentadas também curvas da taxa de desgaste normalizada (**$\tilde{Q}$**) definida como a razão entre a taxa de desgaste (**Q**) e a área de contato nominal (**$\pi.a_c^2$**):

$$\tilde{Q} = \frac{Q}{\pi a_c^2} \qquad (5)$$

As regiões pontilhadas representam a transição entre desgaste moderado e severo. Os valores entre parênteses correspondem às taxas de desgaste para os casos em que o desgaste é predominantemente moderado.

Figura 2.12 - Mapa dos mecanismos de desgaste para configuração pino contra disco com amostras de aço em função da pressão e velocidade normalizadas.

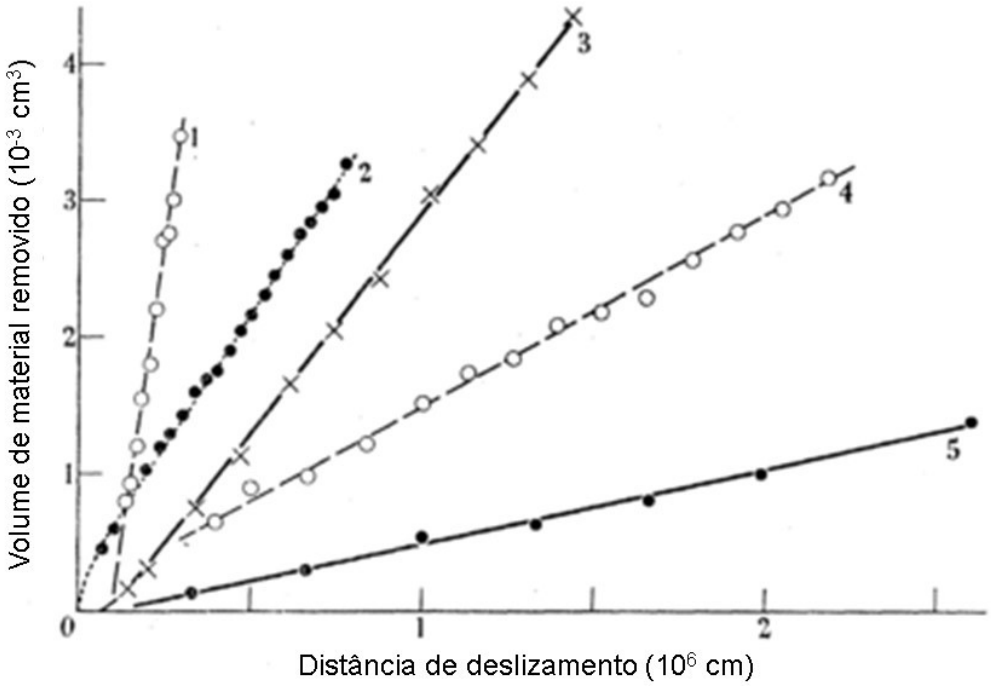


Fonte: Adaptado de Lim e Ashby (1987).

As principais condições do sistema tribológico que exercem grande influência no regime de desgaste por deslizamento puro são: distância e velocidade de deslizamento, carga normal e características dos materiais em contato como por exemplo dureza, composição química e microestrutura. A mudança dessas variáveis pode alterar a taxa de desgaste, podendo resultar na mudança do regime de desgaste.

Para um dado sistema, o coeficiente $\mathbf{K_A}$ é geralmente constante e assim o volume de massa perdida aumentará proporcionalmente com a distância de deslizamento desde que o sistema esteja em regime permanente, esta condição é apresentada na Figura 2.13 para diferentes materiais. Em alguns sistemas pode ser observado no início dos ensaios uma etapa de *running-in* na qual a taxa de desgaste poderá ser maior ou menor do que no regime permanente. Usualmente o cálculo de $\mathbf{K_A}$ desconsidera a etapa de *running-in* (HUTCHINGS, 1992).

Figura 2.13 – Volume de material removido em função da distância de deslizamento em ensaios de pino sobre anel para (1) aço carbono, (2) aço inoxidável ferrítico, (3) 70/30 latão, (4) stellite e (5) aço ferramenta.

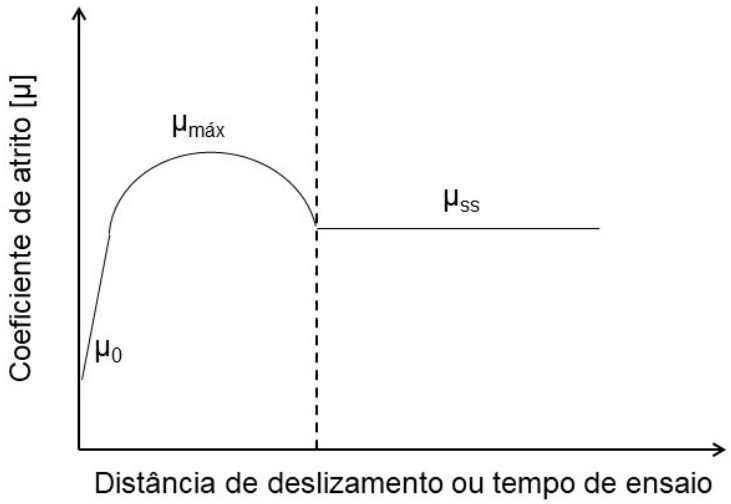


Fonte: Adaptado de Archard e Hirst (1956).

No desgaste por deslizamento a seco de metais, o período de *running-in* se caracteriza pela interação das asperezas e aumento gradual da área de contato até

um valor de equilíbrio. Blau (1981) analisou o processo de *running-in* de diversos sistemas tribológicos e detalhou esses estudos em gráficos que relacionam o coeficiente de atrito com a distância de deslizamento ou o tempo de ensaio. Na Figura 2.14 é apresentado o gráfico proposto por Blau (1981) para desgaste por deslizamento a seco de metais. Durante esse período o coeficiente de atrito parte de um valor inicial (μ_0) e cresce até atingir o pico máximo ($\mu_{máx}$) que se refere ao contato das asperezas mais afiadas. Em seguida, o coeficiente de atrito declina até se aproximar de um valor constante (μ_{ss}) que caracterizará o regime permanente (*steady state*). O tempo de *running-in* depende das características dos materiais deslizantes e o aumento da pressão de contato provoca a redução desse período (BLAU, 1981).

Figura 2.14 – Curva típica do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento ou tempo de ensaio para deslizamento puro a seco de metais.



Fonte: Adaptado de Blau (1981).

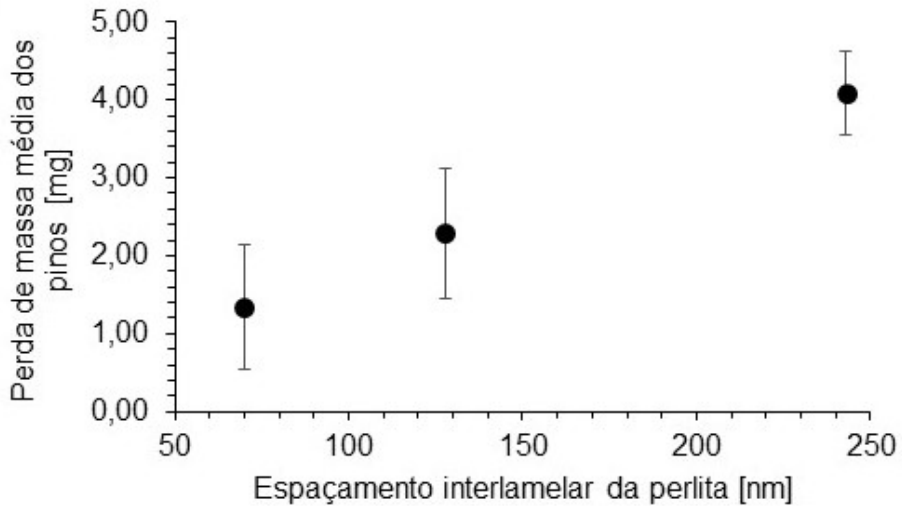
O aumento da carga aplicada no desgaste por deslizamento pode alterar o sistema de um regime moderado de desgaste (*mild wear*) para um regime severo de desgaste (*severe wear*). Welsh (1965) em seus estudos confirmou que o aumento da carga aplicada, mantendo a velocidade de deslizamento constante, provoca a mudança do regime de desgaste de moderado para severo, conforme já apresentado e discutido na Figura 2.11.

Sabe-se também que a microestrutura modifica o comportamento do material no desgaste por deslizamento puro sem lubrificação. Viafara (2005) por

exemplo ensaiou pinos com microestruturas bainíticas (400-420 HV) e perlíticas (320-340 HV) contra discos perlíticos (325-345 HV), foi constatado que o aço perlítico apresentou maior resistência ao desgaste por deslizamento puro devido principalmente à maior habilidade de encruamento da perlita quando comparada à bainita.

Em um trabalho anterior desta autora (2017) foi estudada a influência do espaçamento interlamelar da perlita na resistência ao desgaste por deslizamento puro. Um dos resultados pode ser observado na Figura 2.15. Notou-se que a perda de massa dos pinos aumentou linearmente com o aumento do espaçamento interlamelar e consequentemente com a diminuição da dureza. Em aços perlíticos, quanto maior o espaçamento interlamelar menor será a dureza da estrutura.

Figura 2.15 - Variação da perda de massa média dos pinos em função do espaçamento interlamelar da perlita após ensaios de pino contra disco com carga de 10,38 N e 3.600 segundos de duração.



Fonte: Chaves (2017).

A diferença entre as durezas dos materiais em contato pode também alterar a resistência ao desgaste por deslizamento puro. Viafara e Sinatora (2013), em um dos seus estudos, verificaram a influência da variação da dureza do disco (corpo com maior dureza) no regime de desgaste. Os ensaios foram realizados com carga de 35 N, velocidade de deslizamento de 0,1 m/s e com pinos de bainita (318 HV) e martensita revenida (436 HV) contra discos de aço H13 (356 HV até 596 HV). O aumento da dureza do disco provocou a redução da perda de massa dos pinos, alterando o regime de desgaste do sistema de severo para moderado. Esse

resultado é relevante pois demonstra a influência do material com maior dureza do par na mudança do regime de desgaste. Muitos estudos, como o que gerou a equação de Archard (Equação 2), só consideram para cálculo a dureza do material mais mole do par (HUTCHINGS, 1992).

Para estudar o desgaste por deslizamento entre as superfícies diferentes tribômetros podem ser utilizados. Nesse trabalho foi utilizada a configuração pino contra disco conforme descrito na norma ASTM G-99 (2010).

2.2.2 RCF (*rolling-contact fatigue*)

A fadiga de contato por rolamento (RCF - *rolling contact fatigue*) é um termo que define a falha ou a remoção de material devido à propagação de trincas originadas próximas ou na superfície devido a altas cargas cíclicas (PEREIRA, 2018). A presença de RCF diminui significativamente a vida útil dos componentes do sistema roda-trilho. A geometria da superfície de contato, o escorregamento, a carga e as propriedades dos materiais podem influenciar a resistência a RCF (MAGEL; KALOUSEK, 1996).

A falha por RCF é caracterizada pela iniciação de trincas internas próximas à superfície e sua propagação se dá devido à variação da força de contato gerada pelas cargas cíclicas. Em certas condições, essas trincas superficiais que são geradas e que propiciam a RCF podem ser eliminadas pelo desgaste. Estudos mostraram que a presença de uma microestrutura não uniforme pode favorecer a presença de defeitos como *shelling*. Em rodas ferroviárias usadas a propagação das trincas ocorreu ao longo da interface das microestruturas bainita e perlita devido provavelmente à diferença de dureza entre as fases (GAO et al., 2019).

Escorregamento entre rodas e trilhos ocorre nas curvas da trajetória e durante a aplicação dos freios; maiores escorregamentos (*creepage*) geralmente promovem o crescimento acelerado das trincas provenientes da RCF e um aumento do coeficiente de atrito. Diagramas de *Shakedown* (seção 2.2.2.1 *Shakedown*) podem ser utilizados para estudar a influência do escorregamento em tribossistemas submetidos a cargas cíclicas (MAKINO; KATO; HIRAKAWA, 2012).

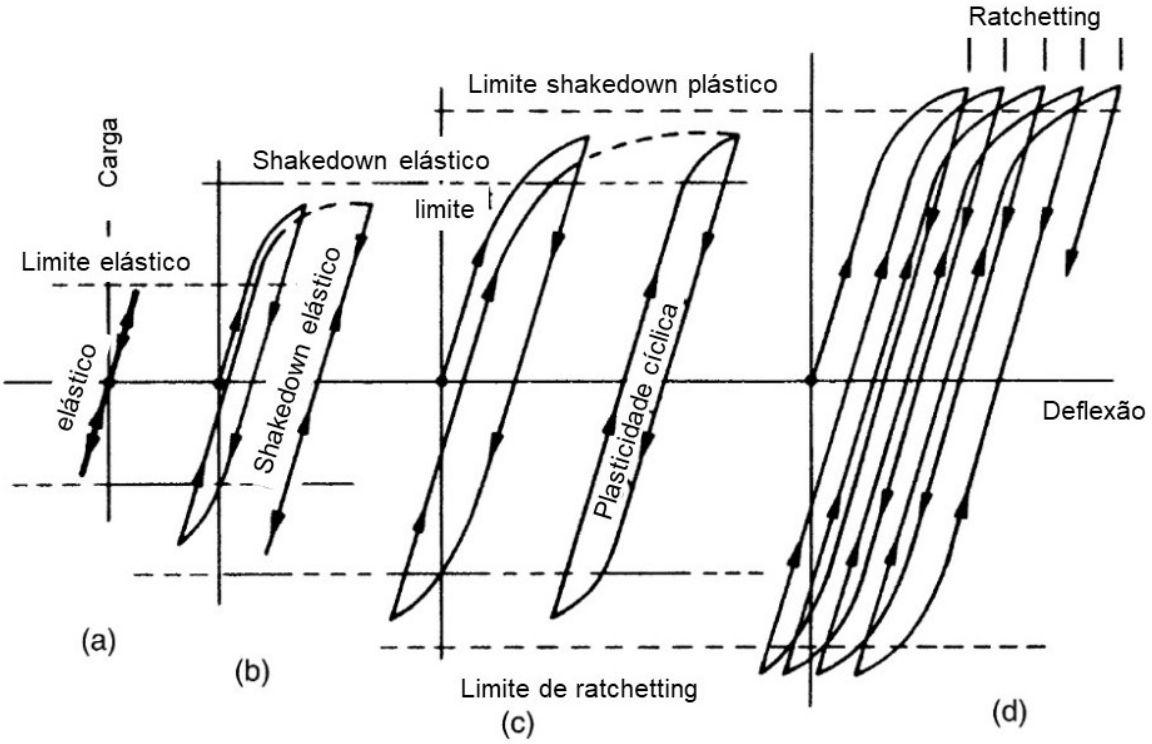
Para avaliar a influência da pressão de contato no desgaste por rolamento de rodas e trilhos ferroviários, Liu e colegas (2019) realizaram ensaios tribológicos

disco contra disco com diferentes tensões de contato, eles notaram que o aumento dessa tensão provoca um acréscimo acentuado da camada deformada plasticamente. Menores cargas (700 MPa) geraram desgaste adesivo das superfícies com uma baixa taxa de desgaste, já cargas superiores (1200 MPa) provocaram maiores taxas de desgaste devido à presença de fadiga de contato por rolamento (LIU et al., 2019).

2.2.2.1 Shakedown

Os materiais do tribossistema podem apresentar diferentes regimes de resposta em função da carga aplicada quando são submetidos a cargas cíclicas. Quando a carga é suficientemente baixa de forma que não ultrapasse o limite de escoamento (limite elástico) do aço, a resposta será totalmente elástica (Figura 2.16(a)). Acima do limite elástico do material, o escoamento plástico acontecerá em algum ponto, porém devido ao encruamento e à formação de tensões residuais, o regime permanente poderá ser totalmente elástico (Figura 2.16(b)). Com a aplicação de cargas cíclicas mais elevadas, em cada ciclo de carga ocorrerão deformações elásticas e plásticas, então será atingido o *shakedown* plástico (plasticidade cíclica) (Figura 2.16(c)). A falha por *ratchetting* ocorrerá quando a carga cíclica ultrapassar o valor limite de *shakedown* plástico (Figura 2.16(d)) (WILLIAMS, 2005).

Figura 2.16 – Diferentes formas da resposta estrutural para carregamentos cíclicos: (a) elástico, (b) *shakedown* elástico, (c) *shakedown* plástico ou plasticidade cíclica, (d) *ratchetting*.



Fonte: Adaptado de Williams (2005).

Devido às altas cargas impostas no transporte *heavy haul*, na região de contato roda-trilho a tensão imposta é maior que o limite de escoamento do material e devido às cargas cíclicas pode ocorrer o processo denominado *shakedown* apresentado por Williams (2005) e descrito na Figura 2.16.

No primeiro contato a superfície deforma plasticamente, porém após atingir um regime estacionário cíclico, a resposta do material é perfeitamente elástica. Estudos mostraram que a geometria inicial em formato de elipse indicada por Hertz se torna aproximadamente retangular se a carga aplicada for superior à carga limite de *shakedown*. Se a carga for excessiva pode gerar falha por fadiga ou levar à fratura dúctil (KAPOOR; JOHNSON, 1992).

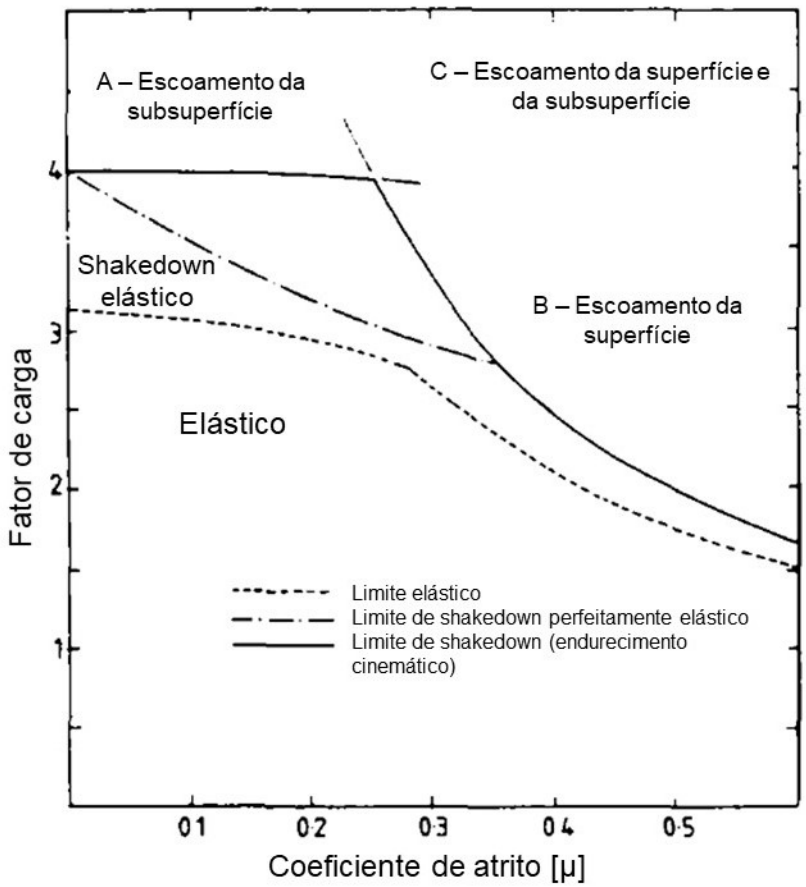
Em geral esse processo de *shakedown* pode ser provocado por três causas: as tensões residuais provocadas pela deformação plástica inicial aumentam a resistência ao escoamento; o encruamento do material aumenta o limite elástico; mudanças geométricas na região do contato podem tanto reduzir como aumentar a pressão aplicada (KAPOOR; JOHNSON, 1992).

O diagrama de *shakedown* proposto por Bower e Johnson (1989) e apresentado na Figura 2.17 estabelece uma relação entre o coeficiente de atrito e o fator de carga. O fator de carga é definido como a razão entre a máxima pressão de contato de Hertz $\mathbf{P_0}$ e a resistência do material ao cisalhamento.

Com esse esquema é possível estimar se o material apresentará, devido ao *shakedown*, escoamento na superfície (região A), na subsuperfície (região B) ou em ambas (região C). Magel e Kalousek (1996) propuseram que *shelling* (defeito comum em rodas ferroviárias) depende da deformação plástica à qual a roda é submetida e pode ser analisado com base nesse diagrama.

Estudos recentes encontraram uma nova solução analítica para o limite de *shakedown,* a solução tridimensional engloba múltiplos carregamentos de Hertz aplicados simultaneamente. Os resultados obtidos indicam que as propriedades dos materiais e a geometria do contato exercem grande influência na resistência (ZHUANG et al., 2019).

Figura 2.17 – Diagrama de *shakedown*. Deformação acumulada em contato rolante-deslizante.



Fonte: Adaptado de Bower e Johnson (1989).

2.2.3 Tribologia aplicada no sistema roda-trilho

Em serviço normal as rodas ferroviárias têm a sua pista de rolamento e friso degradadas por desgaste (por deslizamento e abrasivo) e por fadiga de contato por rolamento acumulado, porém, o modo dominante de dano depende de variáveis construtivas e de operação (LEEPER; ALLEN, 2015).

Dois tipos distintos de condições cinemáticas são observados no contato roda-trilho. No friso ocorre rolamento combinado com deslizamento e a carga é aplicada lateralmente, no entanto em certas curvas do traçado ferroviário ou durante o acionamento dos freios pode ser verificado apenas deslizamento. Na região da pista a carga é aplicada verticalmente e verifica-se também tanto rolamento quanto deslizamento, porém há predominância de rolamento (PEREZ-UNZUETA; BEYNON, 1993; SINGH; SINGH, 1993).

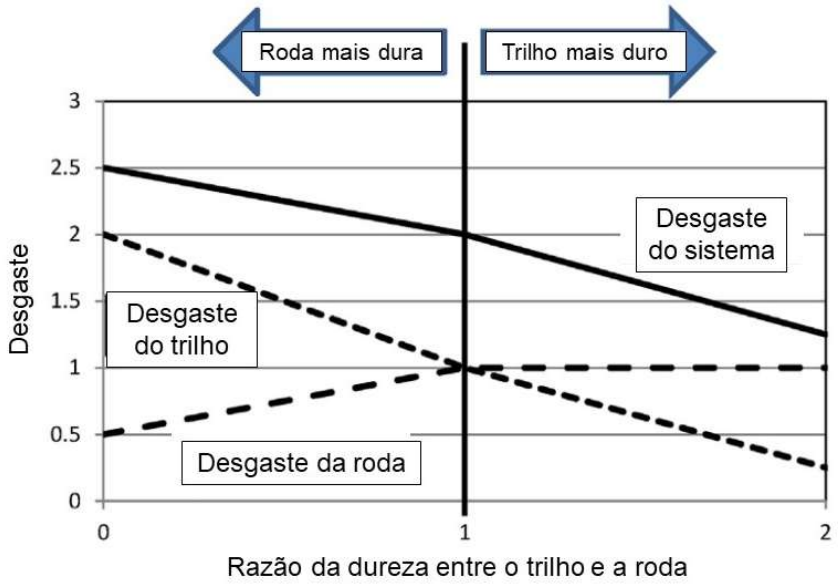
Sabe-se que o teor de carbono é uma das principais variáveis que alteram as características de resistência ao desgaste das rodas ferroviárias pois geralmente modifica também a dureza dos materiais. Estudos de campo sugeriram que o aumento do teor de carbono nas rodas (até o limite recomendado pelas normas) pode diminuir o desgaste tanto nas rodas como nos trilhos (OKAGATA, 2013).

Steel e Reiff (1982) apud Lewis (2019), com base em seus estudos de campo, propuseram uma relação entre o desgaste do sistema roda-trilho e a razão de dureza desses componentes, para eles o desgaste depende principalmente da dimensão da área de contato e que essa dimensão é determinada sobretudo pelo trilho.

Quando a roda é mais dura que o trilho (lado esquerdo da Figura 2.18), o desgaste no trilho diminui com o seu aumento de dureza; como a área de contato roda-trilho irá diminuir, o desgaste da roda irá aumentar devido às maiores tensões de contato nela impostas, no entanto o desgaste total do sistema irá decair. Já no lado direito da Figura 2.18, quando o trilho é o material mais duro do par, a área de contato se manterá constante independentemente da dureza de trilho, assim o desgaste nas rodas se manterá constante e o desgaste total do sistema irá decair. Nesses ensaios a dureza dos materiais foi mensurada apenas no início dos ensaios, então não foi considerado o endurecimento superficial que é um fator

importante para avaliar a resistência ao desgaste das estruturas (LEWIS et al., 2019).

Figura 2.18 – Desgaste no sistema roda-trilho em função da razão entre a dureza do trilho e da roda.



Fonte: Adaptado de Lewis et al (2019) APUD R. Steele, R. Reiff, “Rail – it’s behavior and relationship to total system wear”, Proceedings of the 2nd Heavy Haul Conference, Colorado Springs, USA, Sept. 1982, 1982.

As microestruturas dos aços encontradas nas rodas também exercem influência no seu desempenho. Tradicionalmente as rodas e trilhos ferroviários possuíam microestruturas perlíticas, no entanto nos últimos anos tem-se observado uma tendência de mudança para microestruturas bainíticas. Os primeiros estudos e aplicações começaram na década de 80, porém ainda hoje existe a discussão de qual microestrutura apresenta as melhores características e o melhor desempenho.

Nos aços com microestruturas puramente perlíticas, alguns estudos mostraram que a diminuição do espaçamento interlamelar da perlita (e consequente aumento da dureza) aumenta a resistência ao desgaste por deslizamento (CHAVES et al., 2020; GAO et al., 2019; PEREZ-UNZUETA; BEYNON, 1993; SINGH; SINGH, 1993).

Quando as microestruturas bainíticas e perlíticas são comparadas quanto à resistência ao desgaste por rolamento, grande parte dos estudos demonstram que a perlita apresenta uma melhor resistência devido a sua maior capacidade de encruamento superficial devido às altas cargas impostas no contato roda-trilho

(KALOUSEK; FEGREDO; LAUFER, 1985; LEE; POLYCARPOU, 2005; POINTNER, 2008).

Por exemplo, em ensaios disco contra disco a seco para simular o contato roda-trilho utilizando trilhos ferroviários perlíticos e bainíticos com durezas entre 372 e 446 HV, Kalousek (1985) demonstrou que a perlita apresenta a melhor resistência ao desgaste por rolamento em razão principalmente do maior encruamento superficial devido ao refinamento da microestrutura perlítica. Foi sugerido também que a microestrutura constituída de perlita fina continue sendo utilizada nos trilhos (KALOUSEK; FEGREDO; LAUFER, 1985).

Lee e Polycarpou (2005) realizaram um acompanhamento em campo de trilhos submetidos a altas cargas sem lubrificação perlíticos convencionais e bainíticos (em teste para substituírem os perlíticos convencionais). Nos seus estudos os trilhos bainíticos apresentaram maior dureza que os perlíticos. Já Pointner (2008) comparou o comportamento em campo de trilhos perlíticos e bainíticos com mesma dureza. Porém mesmo a estrutura perlítica apresentando uma melhor resistência ao desgaste por rolamento em seus estudos, Pointner (2008) e Lee e Polycarpou (2005) notaram que a bainita resiste melhor aos danos provocados por fadiga de contato por rolamento. Lee e Polycarpou (2005) não encontraram trincas de RCF nos trilhos bainíticos, sugere-se que isso pode ter ocorrido devido ao desgaste mais acentuado retirar a camada superficial do material que apresentava as trincas.

Estudos recentes realizados em laboratório demonstraram que corpos de prova de rodas ferroviárias forjadas com microestrutura bainítica (457 HV) apresentaram melhor resistência a RCF quando comparadas com a microestrutura perlítica (357 HV) devido à sua maior dureza e capacidade de absorver mais deformação plástica por volume (mensurada através de técnicas de ruido magnético de Barkhausen). As amostras bainíticas apresentaram menor perda de massa e as trincas de RCF se localizaram mais próximas da superfície (REZENDE et al., 2020).

Clayton (1992) observou que para o desgaste por rolamento com escorregamento a bainita com maior dureza (49 HRC e 54 HRC) apresenta melhor desempenho quando comparada à perlita com menor dureza (39 HRC). Resultados semelhantes foram obtidos por Hasan (2018) que comparou trilhos perlíticos (279

HV) e trilhos bainíticos livre de carbonetos (375 HV e 419 HV); os trilhos bainíticos apresentaram menor perda de massa e menor número de trincas de RCF caracterizando assim também uma melhor resistência a RCF. No entanto nos ensaios de Clayton (1992) nos quais as duas microestruturas (perlita e bainita) apresentavam a mesma dureza (39 HRC) o desempenho foi similar.

Outras variáveis do sistema também excercem grande influência sobre a resistência ao desgaste por rolamento com escorregamento, a exemplo do aumento do escorregamento e da pressão de contato que promovem o aumento do desgaste. Para chegar a essas conclusões foram realizados ensaios tribológicos disco conta disco com material de boleto de trilho ferroviário e pista de roda ferroviária submetidos até 2 x 10^5 ciclos com seis diferentes escorregamentos diferentes (de 0% até 1,5%) e quatro pressões de contato (de 900 MPa até 1500 Mpa) (SEO et al., 2016).

2.2.3.1 Regimes de desgaste no contato roda-trilho

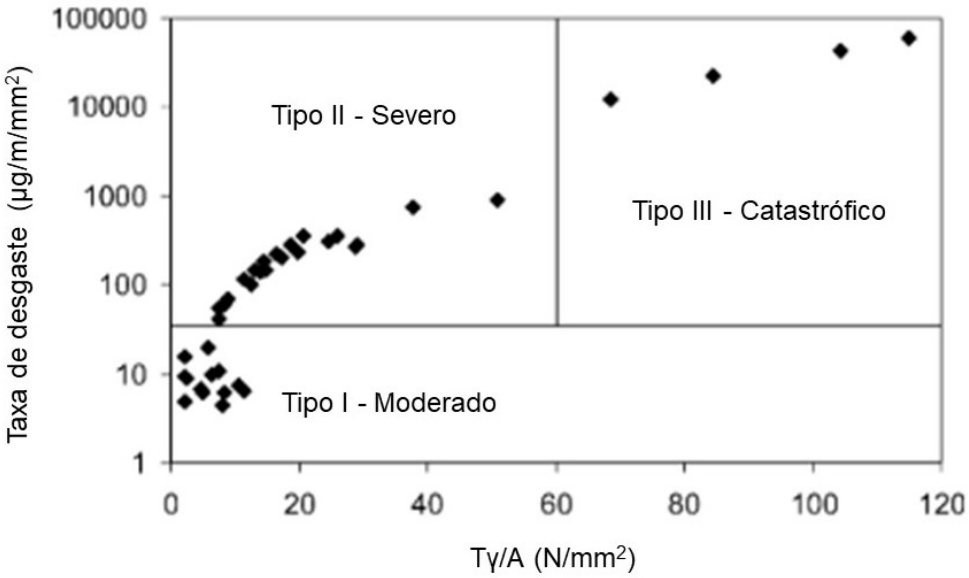
Lewis e Olofsson (2004) observaram no contato roda-trilho, em testes de campo, desgaste nos regimes moderado (*mild*) e severo (*severe*). Nos trilhos o desgaste moderado foi dominante na região do topo do boleto (região de contato com a pista de rolamento da roda) e no canto do boleto (região de contato do friso da roda) claramente ocorreu desgaste severo. Bolton e Clayton (1984) em seus estudos de laboratório sobre o comportamento de aços para trilho ferroviário com contato rolante com escorregamento identificaram três regimes de desgaste que apresentaram boa correlação com os dados medidos em campo. Os três regimes de desgaste encontrados são: moderado, severo e catastrófico.

O parâmetro **Tγ** pode ser utilizado para estimar a severidade do desgaste, conhecido também como *wear number* ou T-gamma, é o produto da força tangencial **T** (força normal multiplicada pelo coeficiente de atrito) e o escorregamento **γ** (diferença percentual da velocidade das superfícies dos discos em um ensaio tribológico disco contra disco) (LEWIS; OLOFSSON, 2009).

Bolton e Clayton (1984) demonstraram que para ensaios em laboratório de rolamento com escorregamento de roda contra trilho (configuração disco-disco), o parâmetro T-gamma dividido pela área nominal de contato **A** e a taxa de desgaste

podem identificar aproximadamente os regimes de desgaste (Figura 2.19). A taxa de desgaste considerada é a perda de massa (em microgramas) dividida pela distância percorrida (em metros) e pela área de contato (em milímetros quadrados). Essa figura foi apresentada por Lewis e Olofsson (2004) com os dados fornecidos pelo trabalho de Bolton e Clayton (1984).

Figura 2.19 – Regimes de desgaste identificados durante ensaios disco contra disco de material do Roda Classe D contra trilho.



Fonte: Adaptado de Lewis e Olofsson (2004).

3 ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR DESLIZAMENTO PURO

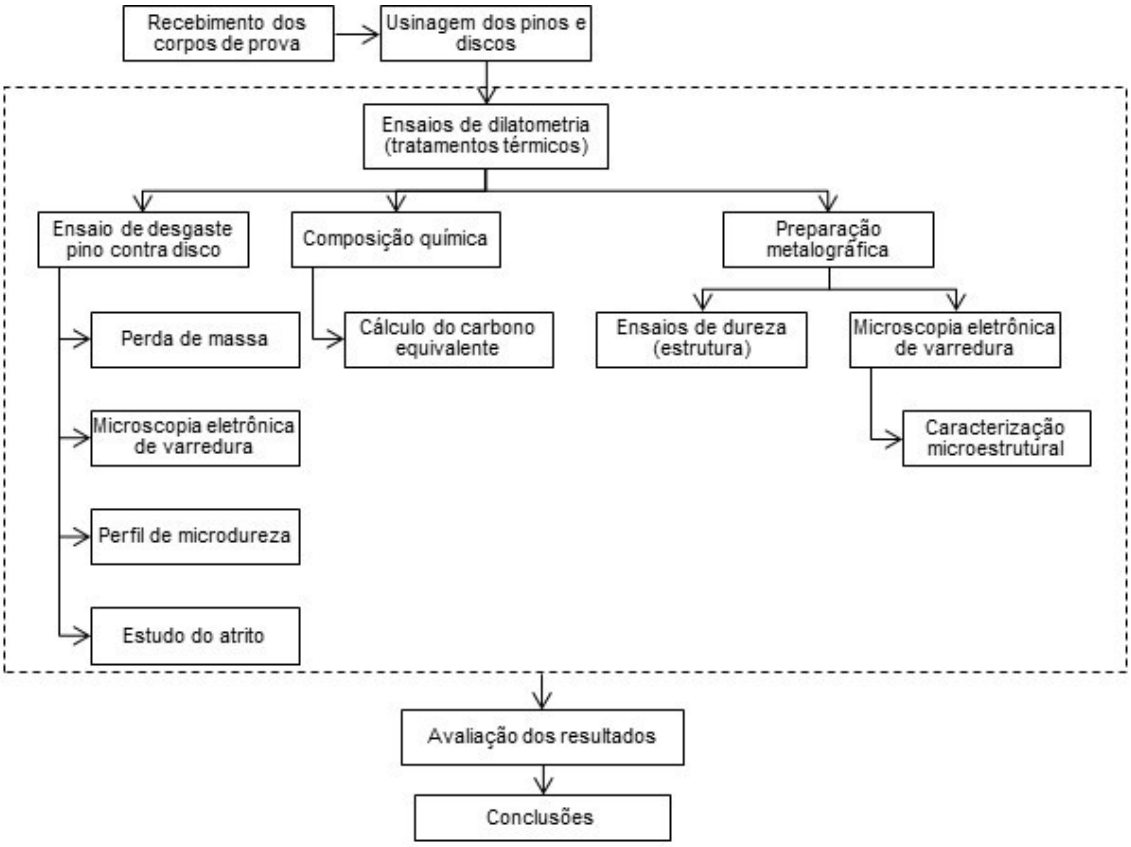
O desgaste por deslizamento puro ocorre em rodas ferroviárias na região do friso e da banda de rodagem durante as curvas na trajetória da ferrovia e na pista de rolamento durante a frenagem. Para estudar o comportamento dos materiais de desgaste por deslizamento, os ensaios do tipo pino contra disco são amplamente utilizados pois apresentam diversas vantagens como baixo custo, reduzido tempo de ensaios e facilidade de reprodução (LEWIS; OLOFSSON, 2009).

Nessa etapa da pesquisa foi realizado um estudo para avaliar a resistência ao desgaste por deslizamento puro das microestruturas encontradas nas rodas ferroviárias utilizando amostras de material modelo (aço 1080). As microestruturas foram obtidas por meio de tratamentos isotérmicos realizados num dilatômetro de têmpera. Nesse capítulo serão descritos os aços utilizados, os tratamentos térmicos, os procedimentos de ensaios e os métodos de análise e ao final serão apresentados e discutidos os resultados.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento de análise seguiu as etapas do fluxograma apresentado na Figura 3.1, cada etapa será descrita detalhadamente ao decorrer do capítulo. Após o recebimento, os corpos de prova foram usinados em formato de pinos e discos. As amostras já usinadas foram tratadas termicamente, sendo que os pinos foram tratados em um dilatômetro de têmpera. Os pinos e discos foram analisados quanto à sua composição química, características microestruturais e dureza. Em seguida foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento puro do tipo pino contra disco e as regiões deformadas das amostras ensaiadas foram caracterizadas. Por fim foram realizadas as discussões dos resultados e conclusões.

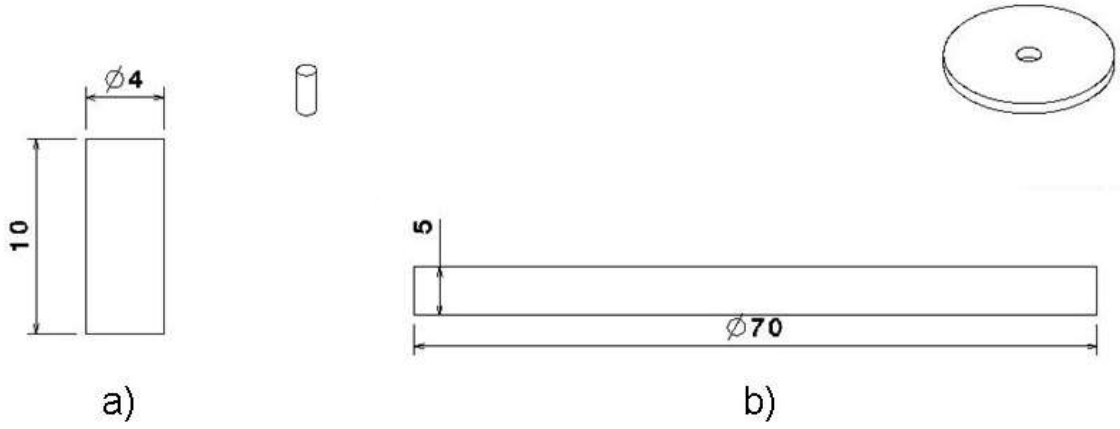
Figura 3.1 - Fluxograma das etapas e ensaios para avaliação da resistência ao desgaste por deslizamento puro para um material modelo.



3.1.1 Amostras

As amostras recebidas de aço ASTM 1080 foram usinadas em formato de pinos com 4 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento e as amostras de aço ASTM H13 em discos com 5 mm de espessura e 70 mm de diâmetro. Na Figura 3.2 são apresentados os desenhos esquemáticos dos corpos de prova utilizados com as dimensões obtidas após o processo de usinagem.

Figura 3.2 – Desenho esquemático dos corpos de prova de a) pino e b) disco utilizados nos ensaios de desgaste por deslizamento puro. Dimensões em mm.



Os discos utilizados em todos os ensaios pino contra disco foram confeccionados da mesma barra de aço ASTM H13 e submetidos a tratamentos térmicos de têmpera e revenido com a finalidade de obter uma dureza superficial mínima de 600 HV.

Um aço eutetoide de elevada pureza (teor reduzido de inclusões) (ASTM 1080) foi definido como material modelo para avaliar a resistência ao desgaste por deslizamento de diferentes microestruturas encontradas em aços utilizados em rodas ferroviárias. Em tratamentos isotérmicos realizados em dilatômetro de têmpera com amostras de pequena dimensão é possível assegurar a obtenção de microestruturas homogêneas ao longo de todo o corpo de prova. O tempo necessário para o final das transformações foi estimado com a utilização de um diagrama de transformação isotérmica para o aço estudado elaborado por Kraus (2005).

Os tratamentos isotérmicos tiveram também como base para sua definição as temperaturas críticas obtidas em estudos anteriores utilizando o mesmo aço (CHAVES, 2017). Para obtenção das temperaturas críticas a norma ASTM A1033-10 sugere o seguinte tratamento térmico: aquecimento desde a temperatura ambiente até 700 °C com taxa de 10 °C/s, aquecimento de 700 °C até 780 °C com taxa 28 °C/h e posterior têmpera até a temperatura ambiente com taxa de resfriamento 150 °C/s. Por meio do método das tangentes no gráfico de temperatura por dilatação linear do tratamento térmico, as temperaturas críticas são estimadas (ASTM A1033-10, 2004).

Os valores encontrados foram: $\mathbf{A_{c1}}$ = 725 °C (temperatura de início da transformação austenítica no aquecimento); $\mathbf{A_{cm}}$ = 738 °C (temperatura de final da transformação austenítica no aquecimento) e $\mathbf{M_s}$ = 225 °C (temperatura de início da transformação martensítica) (ASTM A1033-10, 2004; CHAVES, 2017).

As amostras de pino usinadas foram tratadas termicamente com a utilização do dilatômetro Bähr modelo DIL805A pertencente ao Laboratório de Transformações de Fases do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP (LTF - PMT- USP). Antes de cada ensaio dilatométrico, as amostras foram colocadas em uma cuba de ultrassom com álcool etílico e depois secadas com a finalidade de realizar uma limpeza superficial.

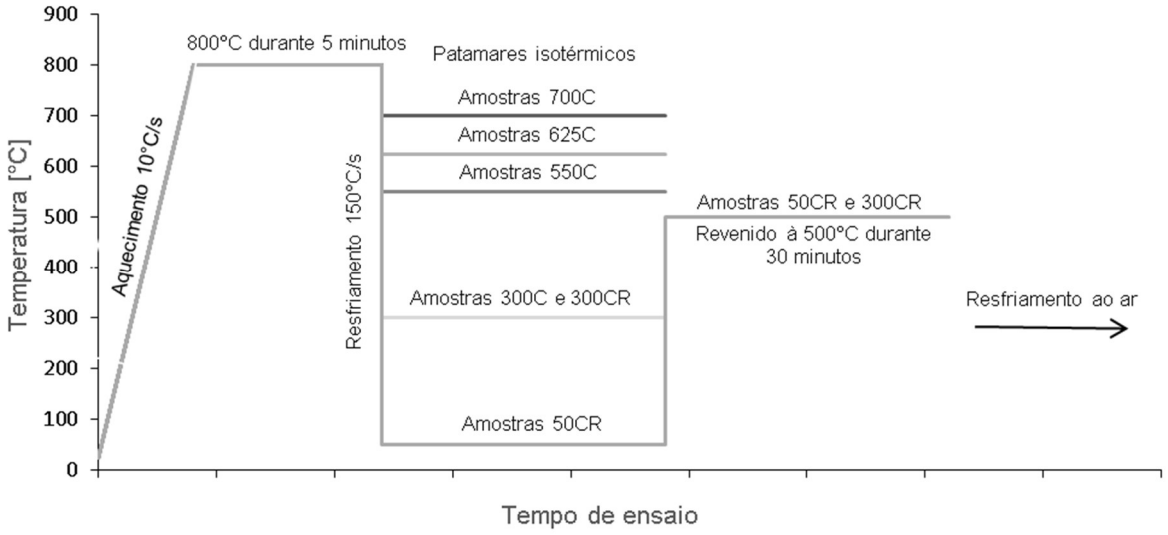
O procedimento seguido em cada tratamento térmico pode ser verificado na Tabela 3.1 e na

Figura 3.3. No início dos tratamentos térmicos as amostras são aquecidas desde a temperatura ambiente até 800 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/s e mantidas nessa temperatura durante cinco minutos para austenitização e homogeneização da microestrutura. Em seguida, são resfriadas com taxa de 150 °C/s até cinco diferentes temperaturas (700 °C, 625 °C, 550 °C, 300 °C e 50 °C) e permanecem nesse patamar até o final das transformações. Duas séries de amostras (tratadas a 300 °C e 50 °C) ainda seguem para o revenido na temperatura de 500 °C durante trinta minutos.

Tabela 3.1 - Tratamentos térmicos aos quais os pinos de aço 1080 foram submetidos antes dos ensaios de desgaste por deslizamento puro (LTF-USP).

Tratamento Térmico					Microestrutura final	Dureza HV	Amostra
Aquecimento a 10 °C/s até 800 °C + Austenitização durante 5 minutos à 800 °C	Resfriamento a 150 °C/s até o patamar	700 °C	Temperatura permanece constante até o final das transformações		Perlita grosseira	224	**700C**
		625 °C			Perlita média	320	**625C**
		550 °C			Perlita fina	381	**550C**
		300 °C			Bainita inferior	614	**300C**
		300 °C		Revenido durante 30 minutos a 500 °C	Bainita inferior revenida	361	**300CR**
		50 °C		Revenido durante 30 minutos a 500 °C	Martensita revenida	363	**50CR**

Figura 3.3 - Desenho esquemático dos tratamentos térmicos realizados no dilatômetro.



3.1.2 Composição química e carbono equivalente

A análise da composição química das amostras foi obtida com a utilização de um espectrômetro de raio-X ARLW da Universidade Federal de Juiz de Fora.

O cálculo do carbono equivalente é realizado de acordo com a Equação 6 que relaciona o carbono equivalente com as porcentagens mássicas dos elementos químicos: carbono, manganês, níquel, cobre, cromo, molibdênio e vanádio. Existem outras equações para estimativa do carbono equivalente, sendo que esta é uma

das mais usuais. Tal equação foi desenvolvida pelo *International Institute of Welding* (IIW) e é utilizada para estimativa da temperabilidade do aço, ou seja, avalia a tendência para formação de martensita no processo soldagem (ASM HANDBOOK, 2001).

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \qquad (6)$$

Fonte: Adaptado de ASM Handbook (2001, p. 1411)

Os pinos foram embutidos em uma matriz de resina fenólica com a utilização de uma embutidora metalográfica modelo EM30D (PMT-USP) e em seguida foram preparados metalograficamente. As amostras primeiramente foram lixadas utilizando lixas d'água para metal com granulometria decrescente (#180, #320, #400, #600 e #1200), polidas com soluções de diamante com granulometria decrescente (6 µm, 3 µm e 1 µm) e atacadas quimicamente na superfície com uma solução de Nital 2% (composição: 2 ml de ácido nítrico e 98 ml de álcool etílico). As amostras preparadas metalograficamente foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura modelo MEV-FEG-Inspect50 pertencente ao departamento PMT-USP.

Nas legendas das figuras apresentadas está indicado qual detector foi utilizado para compor as imagens, detector de elétrons secundários (SE – *secondary electrons*) ou detector de elétrons retroespalhados (BSC – *backscattered electrons*), bem como o aumento correspondente.

Elétrons secundários são elétrons de baixa energia (<50 eV) emitidos pela amostra metálica após interação do feixe incidente e por serem de baixa energia escapam de uma região muito próxima a superfície. Geralmente esse modo é utilizado para observação de superfícies de fratura ou de microestruturas submetidas à ataque químico, condições onde a topografia da superfície é analisada. Já o fenômeno de retroespalhamento depende principalmente do número atômico dos átomos da amostra, a intensidade do sinal emitido pela amostra varia com essa grandeza. Quando se pretende analisar a composição química da amostra ou características especificas (óxidos, inclusões, fases) o detector de elétrons retroespalhados deve ser utilizado (COLPAERT, 2008).

O espaçamento lamelar da perlita foi calculado pelo “método da interseção aleatória” utilizando imagens de MEV de três regiões diferentes para cada amostra perlítica com o auxílio do software ImageJ. Traçou-se uma linha de interseção sobre a perlita com a menor distância interlamelar e esse comprimento foi dividido pelo número de interseções da linha com as lamelas de cementita. Com os valores obtidos do espaçamento interlamelar mínimo foi calculada a média aritmética simples para cada amostra.

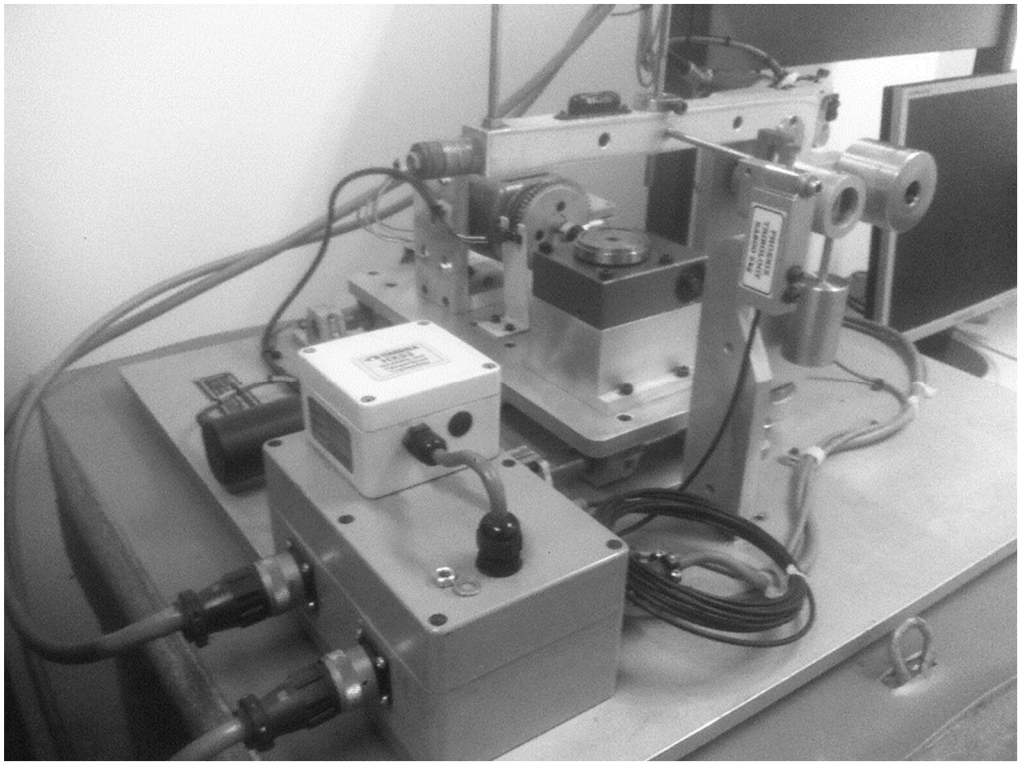
Num tratamento isotérmico, supõe-se que a distância interlamelar da perlita é constante ao longo de toda a amostra, assim é válido medir a menor distância interlamelar visualizada na imagem, pois corresponde à região em que as lamelas perlíticas estão mais perpendiculares à superfície da amostra (COSTA E SILVA, 2006).

Para avaliação da dureza, os pinos e discos foram embutidos, lixados e polidos seguindo a mesma ordem de granulometria que para a análise metalográfica. As medições de dureza foram obtidas pelo microdurômetro modelo Shimadzu HMV – 2TQDW do PMT–USP. Para cada medição foi aplicada uma carga de 100 g durante 10 segundos (ASTM E384-11, 2012).

3.1.3 Ensaios de desgaste por deslizamento

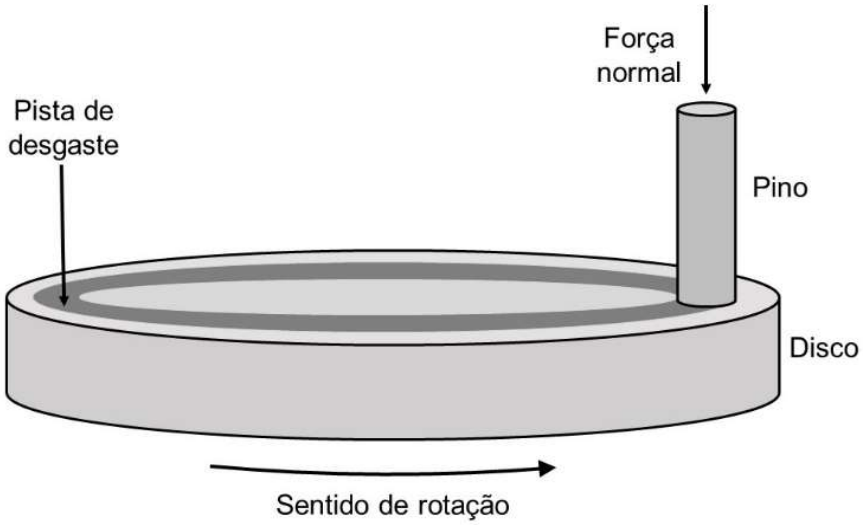
Os ensaios do tipo pino contra disco foram realizados no tribômetro PLINT TE-79 do Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LFS – USP) de acordo com as recomendações da norma ASTM G99-05. A Figura 3.4 exibe o equipamento utilizado e a Figura 3.5 um desenho esquemático da montagem do pino contra disco. O disco é fixado na base e um motor elétrico promove a sua rotação, o pino, por sua vez, é acoplado no braço móvel por uma garra e a carga é aplicada sobre o pino por meio de uma massa (ASTM G99-05, 2010). Não foram utilizados dispositivos para retirada de *debris,* esses aparatos servem para evitar a recirculação dos *debris* no contato.

Figura 3.4 - Plint TE-79 - equipamento utilizado para os ensaios de desgaste pino – disco.



Fonte: Chaves (2017).

Figura 3.5 - Desenho esquemático da montagem ensaio pino contra disco.



Fonte: Chaves (2017).

No início de cada ensaio foi realizado o assentamento do pino com o auxílio de uma lixa #220 fixada no disco durante 30 segundos com o objetivo de obter a mesma área de contato inicial e rugosidade em todos os ensaios. Em seguida foi realizada a limpeza das amostras: os pinos e discos foram imersos num recipiente

com álcool etílico, colocados numa cuba de ultrassom por um período de 10 minutos e secados com ar comprimido.

Na sequência o conjunto pino contra disco foi fixado conforme a posição ilustrada na Figura 3.5 e foi iniciado o ensaio seguindo a sequência de programação detalhada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Programação dos ensaios pino contra disco com cada etapa utilizada no equipamento Plint TE-79.

Descrição	**Etapa**	**Próx. Etapa**	**Duração da etapa [s]**	**Modo de aquisição [s]**	**Rotação [rpm]**	**Posição X [mm]**	**Motor [-desabilitado, + habilitado]**	**Eixo X [-desabilitado, + habilitado]**	**Braço [+ elevado, - solto]**	**Distância [- desligado, + contando]**
Apagar contadores	1	2	5		0R	0R	-	-	+	-
Posição X	2	3	C Stp-	1	0R	25	-	+	+	+
Estabilizar rotação	3	4	C Stp+	1	190	0R	+	+	+	+
Abaixar braço	4	5	10	1	0R	0R	+	+	-	+
Ensaios	5	6	3600	1	0R	0R	+	+	-	+
Levantar braço	6	7	10	1	0R	0R	+	+	+	+
Finalizar	7	Exit	10	1	0R	0R	-	-	+	+

Os parâmetros utilizados nos ensaios pino contra disco estão detalhados na Tabela 3.3:

Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados nos ensaios de desgaste a seco do tipo pino contra disco.

Parâmetro	Descrição
Lubrificação entre as amostras	Ausente
Carga aplicada	10,38 N
Modo de aplicação da carga	Peso morto
Velocidade tangencial de deslizamento	0,5 m/s
Raio da pista de desgaste (disco)	25 mm
Velocidade de rotação do disco	190 rpm
Tempo de deslizamento	3600 segundos
Distância percorrida	1800 m
Pressão de contato	0,8 MPa
Quantidade de réplicas para cada amostra	5

Uma célula de carga acoplada ao tribômetro pino-disco mensura o valor da força tangencial (força de atrito) durante o decorrer do ensaio, assim o coeficiente de atrito (COF) é calculado em função da razão entre a força de atrito (**F_t**) e a força normal (**F**) aplicada conforme a Equação 7. Os valores médios de coeficiente de atrito foram calculados desprezando a etapa inicial de *running-in*, ou seja, após a estabilização da força de atrito.

$$COF = \mu = \frac{F_t}{F} \qquad (7)$$

A perda de massa das amostras foi calculada, com uma balança com precisão de 10^{-5} g modelo Mettler Toledo XP205, por meio da diferença entre a massa dos pinos e discos no início e no final dos ensaios de desgaste. Serão apresentados as médias aritméticas simples e os desvios padrão amostral para cada série de amostras.

3.1.3.1 Caracterização da superfície deformada

Para o estudo da camada deformada, os pinos provenientes dos ensaios pino contra discos foram embutidos em uma matriz de resina fenólica e em seguida preparados metalograficamente: lixas com granulometria #180, #320, #400, #600, #1200; polimento em solução de diamante (6 µm, 3 µm e 1 µm) e ataque químico superficial com Nital 2%. Em seguida, as amostras foram examinadas no microscópio eletrônico de varredura modelo MEV-FEG-Inspect50 do PMT-USP.

Essas mesmas amostras de pinos foram novamente polidas com solução de diamante (granulometria de 9 µm, 6 µm e 3 µm) e analisadas num microdurômetro Shimadzu HMV – 2TQDW (PMT-USP) para medições de microdureza Vickers. Foram realizados perfis de microdureza desde a superfície de desgaste até uma distância de 0,08 mm (carga 50 g durante 10 segundos e 5 medições em cada distância) (ASTM E384-11, 2012).

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.2.1 Composição química e carbono equivalente

As composições químicas das amostras utilizadas nos ensaios pino contra disco são apresentadas na Tabela 3.4, os valores de concentração química para os discos (aço H13) são os limites recomendados em norma. O carbono equivalente para o aço 1080 calculado conforme a Equação 6 foi de 0,8862%p, valor correspondente a um aço hipereutetoide. O aço 1080 apresentou elevada pureza na sua composição química com concentrações muito reduzidas de enxofre, fósforo e alumínio.

Tabela 3.4 - Composição química das amotras de pino e discos utilizadas nos ensaios pino contra disco para um material modelo.

Concentração química [%p]	
Pino (Aço 1080)	**Disco (Aço H13) (limites recomendados em norma*)**
Carbono = 0,8010	Carbono = 0,32 – 0,45 *
Silício = 0,1780	Silício = 0,80 – 1,20 *
Enxofre = 0,0062	-
Nitrogênio = 0,0029	-
Manganês = 0,5111	Manganês = 0,20 – 0,50 *
Fósforo = 0,0073	-
Alumínio = 0,0002	-
-	Cromo = 4,75 – 5,50 *
-	Molibdênio = 1,10 – 1,75 *
-	Vanádio = 0,80 – 1,20 *

Fonte: Autora e (*) adaptado de ASM Handbook (2001, p.1120).

3.2.2 Caracterização microestrutural

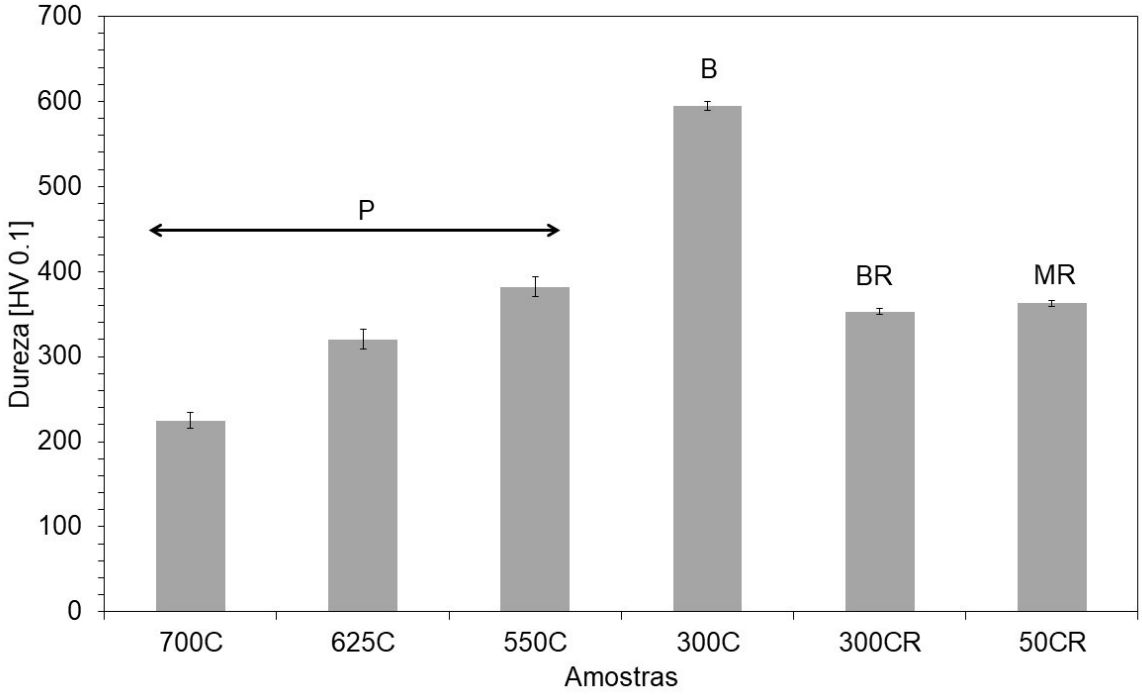
Na Figura 3.6 e na Tabela 3.5 são apresentados os valores de dureza Vickers do disco e dos pinos em função do tratamento térmico utilizado e a microestrutura encontrada para cada tratamento térmico. Os valores encontrados são similares aos observados para cada microestrutura na literatura. Por exemplo, para a transformação isotérmica de um aço eutetoide, Digges e Rosenberg (1960) encontraram durezas de aproximadamente 250 HV para perlita grosseira, 400 HV para perlita fina e 600 HV para bainita inferior (formada em baixas temperaturas), valores esses similares aos descritos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Dureza e microestrutura dos pinos de material modelo e discos de H13.

Amostra	Utilização	Dureza [HV]	Microestrutura	Espaçamento lamelar da perlita [nm]
700C (*)	Pino	225 ± 9	Perlita grosseira	243 ± 9
625C (*)	Pino	320 ± 12	Perlita média	128 ± 6
550C (*)	Pino	382 ± 11	Perlita fina	70 ± 4
300C	Pino	594 ± 5	Bainita inferior	-
300CR	Pino	353 ± 4	Bainita revenida	-
50CR	Pino	363 ± 4	Martensita revenida	-
Aço H13	Disco	627 ± 14	-	-

Fonte: Autora e (*) adaptado de Chaves (2017).

Figura 3.6 – Valores de microdureza Vickers em função do tipo de tratamento térmico aos quais as amostras foram submetidas. P (perlita), B (bainita), BR (bainita revenida) e MR (martensita revenida).



Para as amostras perlíticas (700C, 625C e 550C) constatou-se que a dureza da microestrutura aumentou com a redução da temperatura do patamar isotérmico e consequente redução do espaçamento interlamelar da perlita, resultados similares foram obtidos por Gensamer (1942) e por Digges e Rosenberg (1960) para transformação isotérmica de aços eutetoides. Verificou-se também que o processo de revenido ao qual a amostra 300CR foi submetida (500 °C durante 30 minutos) promoveu uma redução acentuada da dureza da amostra bainítica desde 594 HV até 353 HV devido à aniquilação de discordâncias e redistribuição do carbono entre os constituintes.

Apresentam-se nas próximas três figuras (Figura 3.7, Figura 3.8 e Figura 3.9) as microestruturas de cada amostra perlítica obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura com detector SE (elétrons secundários). Para cada microestrutura são visualizadas duas imagens com aumentos diferentes.

As micrografias observadas correspondem às amostras que foram tratadas nos patamares isotérmicos com maiores temperaturas, 700 °C, 625 °C e 550 °C, respectivamente. Observa-se nessas três condições uma microestrutura de matriz perlítica com diferentes espaçamentos interlamelares para cada temperatura. Os

espaçamentos interlamelares médios calculados foram de 243 ± 9 nm, 128 ± 6 nm e 70 ± 4 nm respectivamente.

Percebe-se que o espaçamento interlamelar perlítico é proporcional à temperatura de transformação, quanto menor a temperatura de transformação, menor será a energia disponível para difusão do carbono reduzindo assim a espessura das lamelas perlíticas (ZENER, 1945).

Os valores encontrados apresentam uma relação aproximadamente linear entre o recíproco do espaçamento interlamelar perlítico (**$1/S_0$**) e a temperatura de tratamento isotérmico. Esses resultados são semelhantes aos apresentados por Bhadeshia (2006) (aço 0,8%p C) e Mei (1983) (aço 0,84%p C – 0,033%p Nb) para ligas similares de aço (CHAVES, 2017).

Figura 3.7 – Aspecto da microestrutura encontrada na amostra 700C tratada isotermicamente no patamar de 700 °C. Dureza 225 HV. Perlita: 243 ± 9 nm. a) SE - 5.000x b) SE - 20.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).

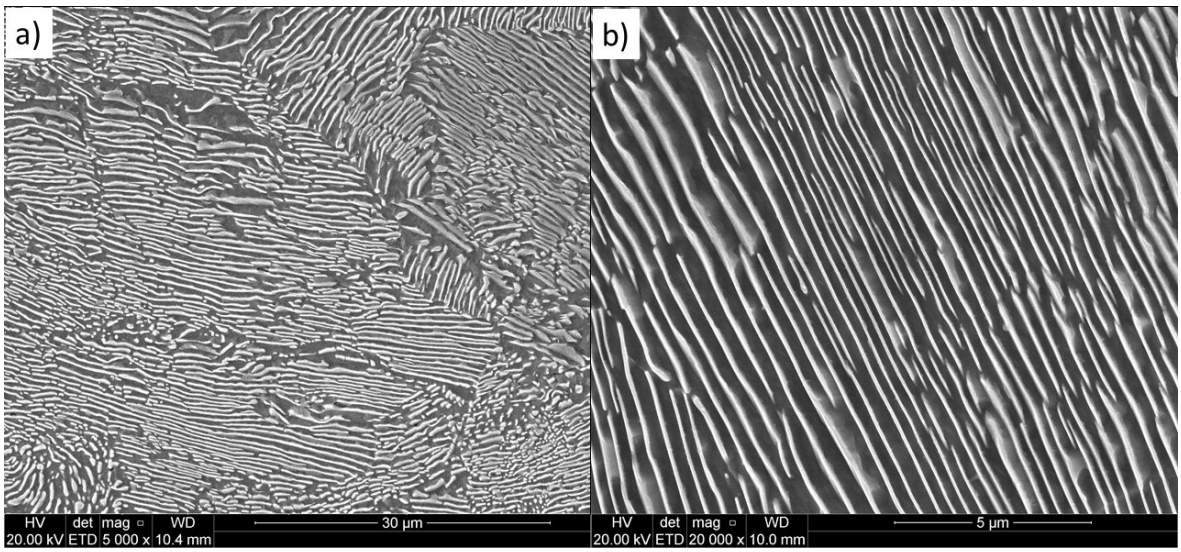


Figura 3.8 - Aspecto da microestrutura encontrada na amostra 625C tratada isotermicamente no patamar de 625 °C. Dureza 320 HV. Perlita: 128 ± 6 nm. a) SE - 5.000x b) SE - 20.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).

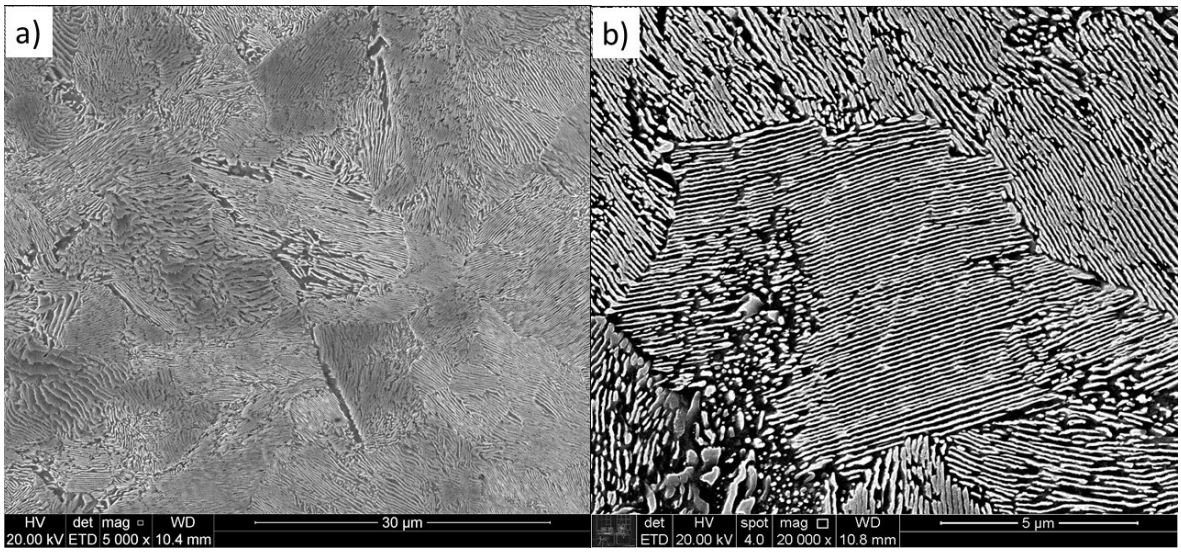
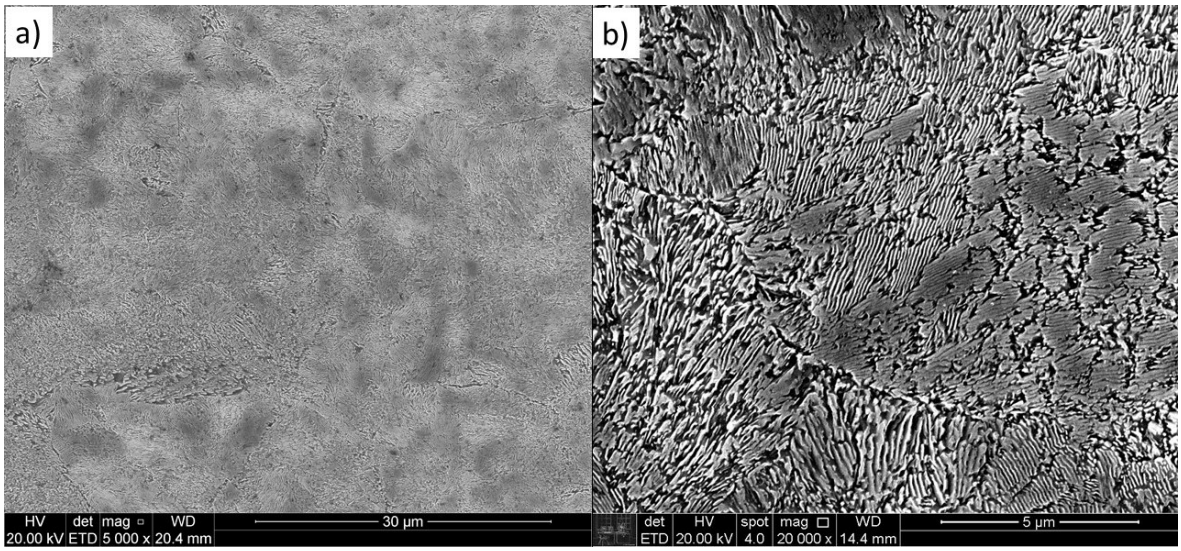


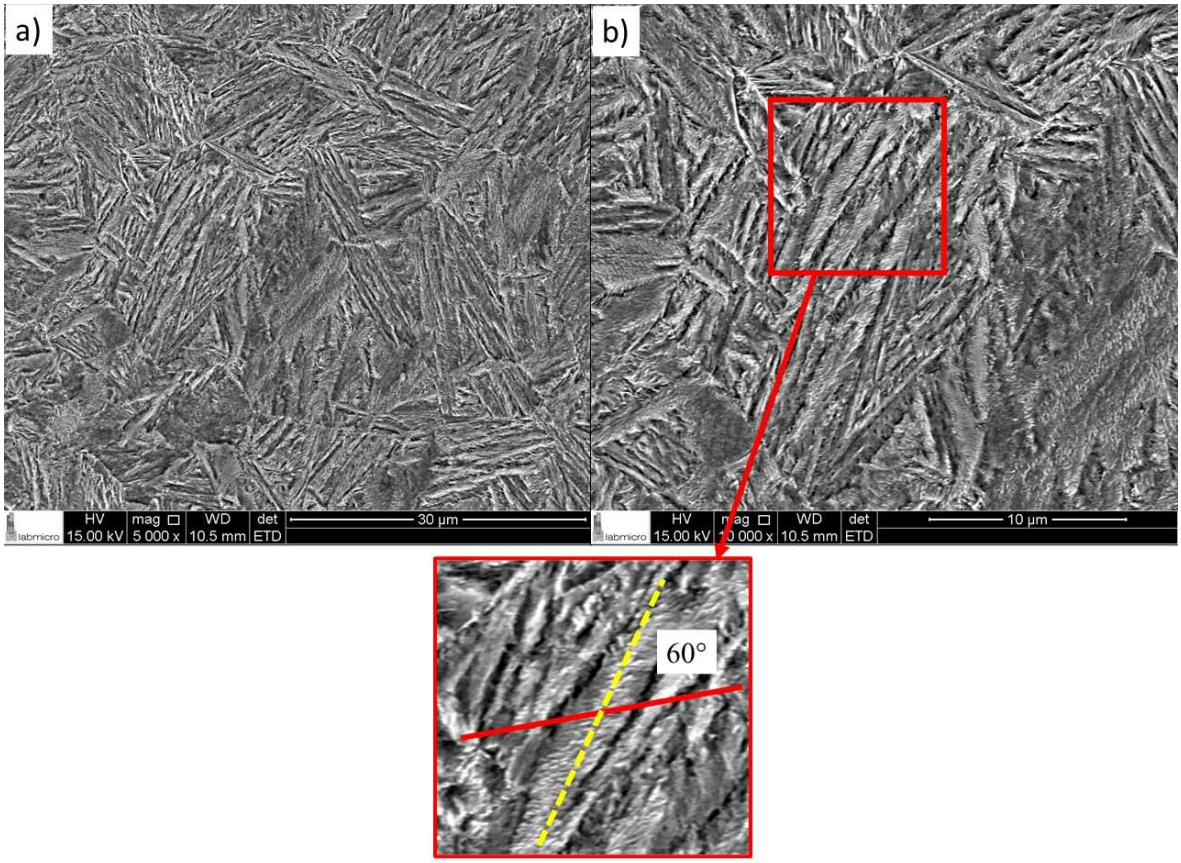
Figura 3.9 – Aspecto da microestrutura encontrada na amostra 550C tratada isotermicamente no patamar de 550 °C. Dureza 382 HV. Perlita: 70 ± 4 nm . a) SE - 5.000x b) SE - 20.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A microestrutura encontrada na Figura 3.10 (amostra 300C) corresponde à bainita inferior composta de longas placas de ferrita acicular com carbonetos precipitados também em seu interior. Na bainita, as partículas de cementita frequentemente precipitam com apenas uma orientação: aproximadamente 60° em relação ao eixo da placa de bainita. (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006). No detalhe da Figura 3.10(b) observa-se que a linha amarela tracejada (eixo da placa

de ferrita) e a linha vermelha (orientação da cementita) formam um ângulo em torno de 60°. Nota-se ainda na imagem pequenas regiões escuras sem estrutura acicular (microestrutura frequentemente denominada martensita-austenita - MA) (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

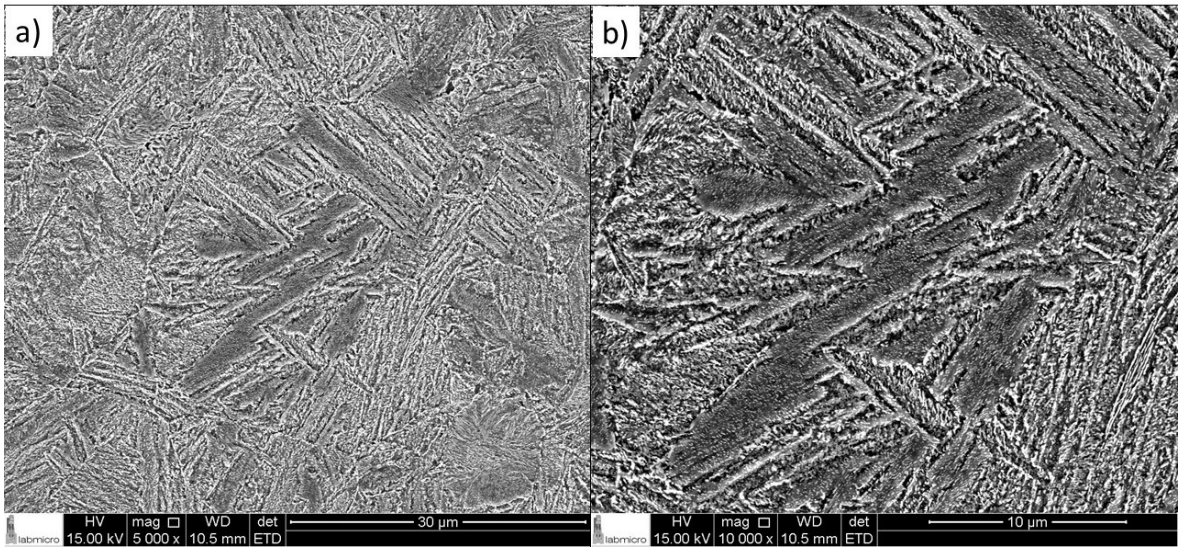
Figura 3.10 - Aspecto da microestrutura encontrada na amostra 300C tratada isotermicamente no patamar de 300 °C. Dureza 594 HV. Bainita. a) SE - 5.000x b) SE - 10.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A Figura 3.11 (amostra 300CR) apresenta uma microestrutura constituída por bainita revenida. Diferente da bainita da amostra 300C, observa-se o engrossamento dos carbonetos devido ao processo de revenido (500 °C durante 30 minutos).

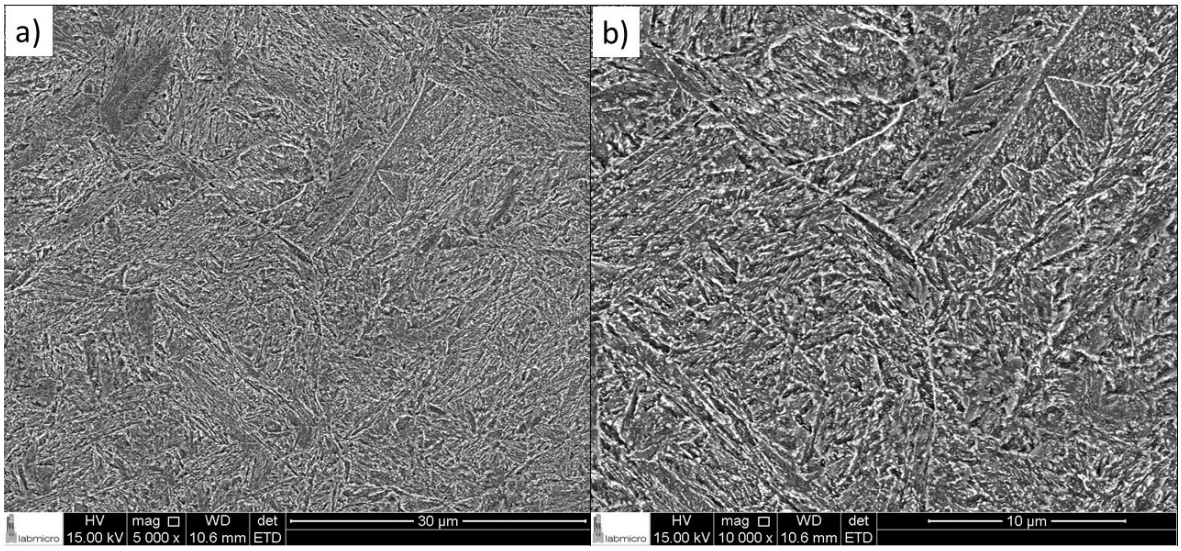
No processo de revenimento o material é aquecido até uma temperatura inferior a temperatura de início de transformação austenítica e é mantido nessa temperatura por um período de tempo com o objetivo, em grande parte das aplicações, de aliviar as tensões internas provenientes da têmpera, reduzir a dureza e aumentar a tenacidade e a ductilidade do material.

Figura 3.11 - Aspecto da microestrutura encontrada na amostra 300CR tratada isotermicamente no patamar de 300 °C e revenida a 500 °C durante 30 minutos. Dureza 353 HV. Bainita revenida. a) SE - 5.000x b) SE - 10.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



Na Figura 3.12 verifica-se uma microestrutura de martensita revenida com partículas de carbonetos engrossadas devido ao revenido (estrutura acicular menos definida que a martensita sem revenir). Entre as placas de martensita e nos contornos de grão são observados filmes de cementita. Essas amostras foram revenidas na temperatura de 500 °C durante 30 minutos.

Figura 3.12 - Aspecto da microestrutura encontrada na amostra 50CR tratada isotermicamente no patamar de 50 °C e revenida à 500 °C durante 30 minutos. Dureza média 363 HV. Martensita revenida. a) SE – 5.000X b) SE – 10.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



3.2.3 Ensaios de desgaste por deslizamento puro

As perdas de massa média com um desvio padrão para os pinos após os ensaios de desgaste são apresentadas na Tabela 3.6 para as amostras provenientes dos diferentes tratamentos térmicos estudados. A perda de massa foi calculada pela diferença de massa das amostras limpas antes e depois dos ensaios tribológicos.

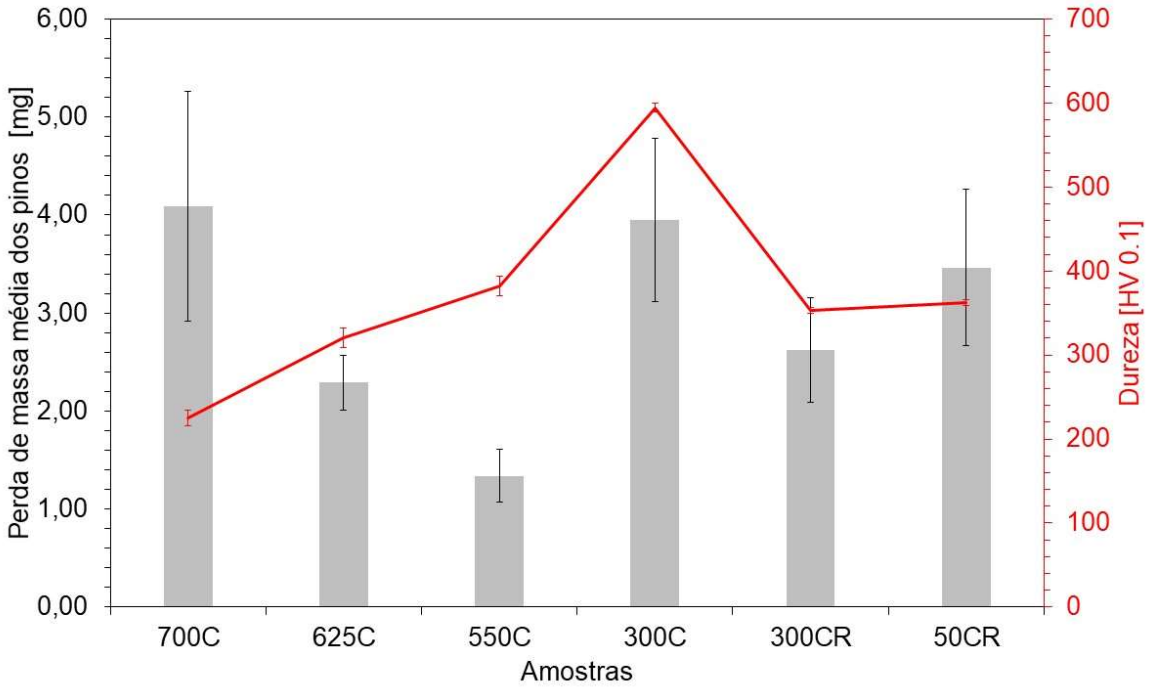
Tabela 3.6 - Perda de massa dos pinos após ensaios de desgaste por deslizamento puro.

Amostra	Dureza pinos [HV]	Perda de massa dos pinos [mg]
700C (*)	225 ± 9	4,1 ± 1,2
625C (*)	320 ± 12	2,3 ± 0,3
550C (*)	382 ± 11	1,3 ± 0,3
300C	594 ± 5	4,0 ± 0,8
300CR	353 ± 4	2,6 ± 0,5
50CR	363 ± 4	3,5 ± 0,8

Fonte: Autora e (*) adaptado de Chaves (2017).

Para melhor visualização e análise, apresenta-se na Figura 3.13 a perda de massa média dos pinos para cada condição de tratamento térmico em função da dureza Vickers das amostras antes dos ensaios de desgaste.

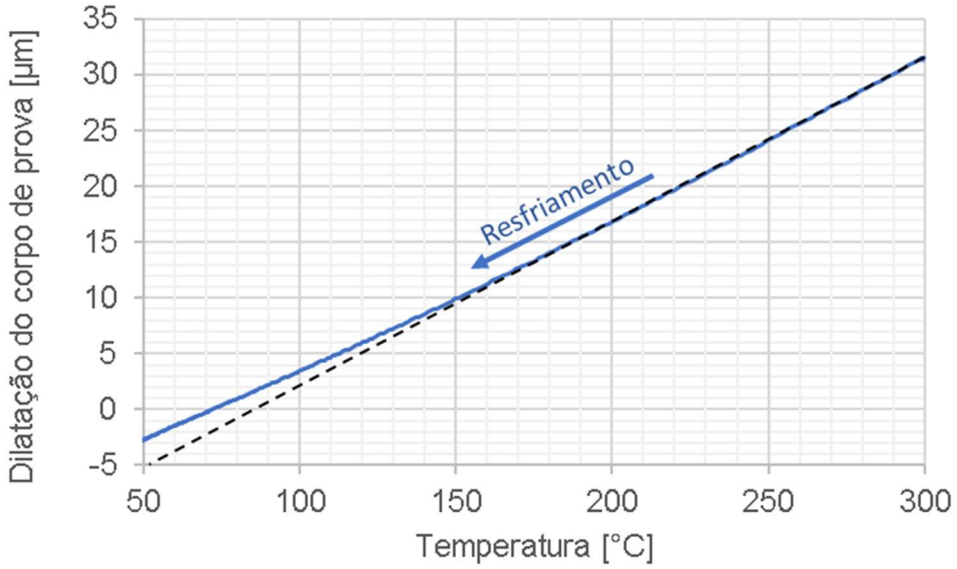
Figura 3.13 - Perda de massa média dos pinos de material modelo após ensaios de desgaste pino contra disco em função da dureza Vickers antes dos ensaios.



Nas amostras perlíticas, nota-se uma maior perda de massa para microestruturas com menores durezas. No entanto, para as amostras 300C (bainita inferior) com dureza consideravelmente superior, a perda de massa também é elevada.

Supõe-se que a amostra 300C pode apresentar uma fração pequena de martensita na sua estrutura o que explicaria tal comportamento. Levanta-se a hipótese que durante o tratamento térmico realizado nessa série de amostras, o tempo no qual as amostras permaneceram no patamar de 300 °C pode não ter sido suficiente para transformar toda austenita em bainita além desse patamar ser próximo à temperatura $\mathbf{M_s}$ (estimada em 225 °C em trabalho anterior da autora (2017)). Assim, quando as amostras foram resfriadas ao ar desde o patamar isotérmico até a temperatura ambiente, a austenita remanescente teria se transformado em martensita. Essa hipótese é confirmada a partir da curva dilatométrica na etapa de resfriamento como observada na Figura 3.14. Nota-se um tênue desvio da linearidade na curva de resfriamento indicando um aumento de volume na amostra o que sugere a transformação de uma pequena fração da austenita remanescente em martensita.

Figura 3.14 - Curva proveniente do ensaio dilatométrico. Etapa de resfriamento ao ar desde a temperatura de 300 °C até 50 °C para uma amostra 300C utilizada em ensaios pino contra disco.



Na Tabela 3.7 são apresentados os valores de taxa de desgaste e coeficiente adimensional de desgaste (coeficiente de Archard) encontrados depois dos ensaios de desgaste por deslizamento puro. A amostra com microestrutura de perlita fina (550C) apresentou a menor taxa de desgaste entre todas as amostras. Esses valores de taxas de desgaste correspondem, segundo Hutchings (1992), a um regime moderado de desgaste.

Tabela 3.7 – Taxa de desgaste e coeficiente de desgaste K_A em função da temperatura do tratamento isotérmico para os pinos de material modelo provenientes dos ensaios pino contra disco.

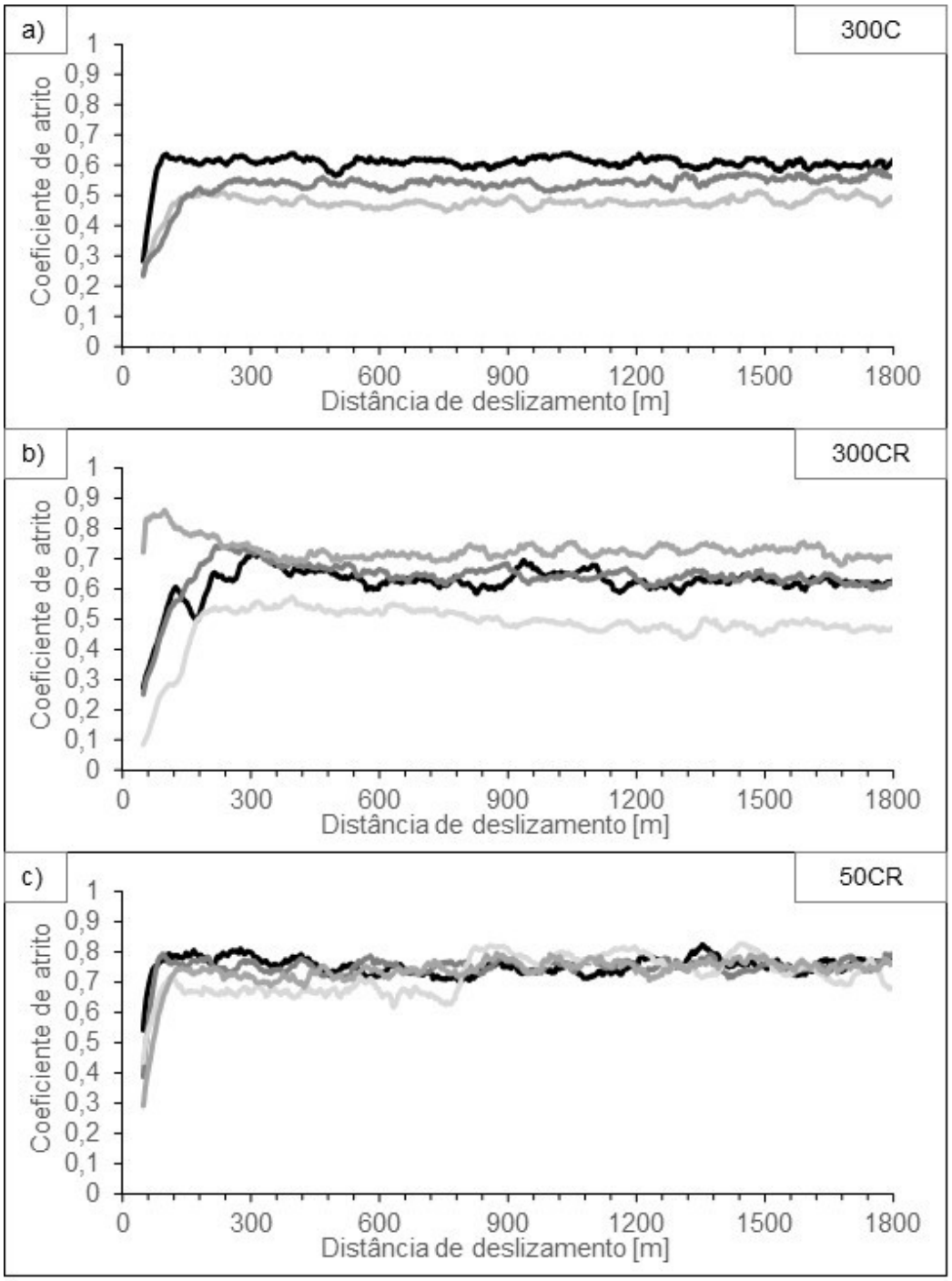
Amostra	Dureza [HV]	Força normal [N]	Perda de massa do material mais mole [mg]	Taxa de desgaste [mm^3/m] [10^{-3}]	Coeficiente de desgaste adimensional K_A [10^{-5}]
700C (*)	225	10,38	4,1	0,29	6,12
625C (*)	320	10,38	2,3	0,16	4,89
550C (*)	382	10,38	1,3	0,09	3,41
300C	594	10,38	4,0	0,28	15,68
300CR	353	10,38	2,6	0,19	6,17
50CR	363	10,38	3,5	0,24	8,39

Fonte: Autora e (*) adaptado de Chaves (2017).

Nos gráficos da Figura 3.15 são apresentados os valores de coeficiente de atrito (COF) em função da distância de deslizamento para os ensaios de deslizamento puro das amostras 300C (bainita – 594 HV), 300CR (bainita revenida – 353 HV) e 50CR (martensita revenida – 363 HV) respectivamente. Cada curva corresponde a um ensaio realizado, foram executadas cinco réplicas para cada condição, ou seja, para cada microestrutura.

Nota-se que no início de todos os ensaios o coeficiente de atrito começou em um valor baixo (μ_0) e aumentou até ocorrer a sua estabilização após cerca de 300 metros quando provavelmente atingiu o regime permanente (μ_{ss}). Para deslizamento a seco de metais, o período de *running-in* corresponde ao contato inicial, acomodação das asperezas e aumento gradativo da força de atrito até atingir um valor máximo ($\mu_{máx}$) e posterior decaimento para um patamar de atrito constante. Esse comportamento coincide com o estudado por Blau (1981).

Figura 3.15 - Curvas do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para as amostras a) 300C, b) 300CR e c) 50CR.



Na Tabela 3.8 são apresentadas as médias com um desvio padrão dos coeficientes de atrito para cada microestrutura após o período de *running-in* estimado em 300 metros de deslizamento. Tais coeficientes de atrito são relacionados com a dureza do material na

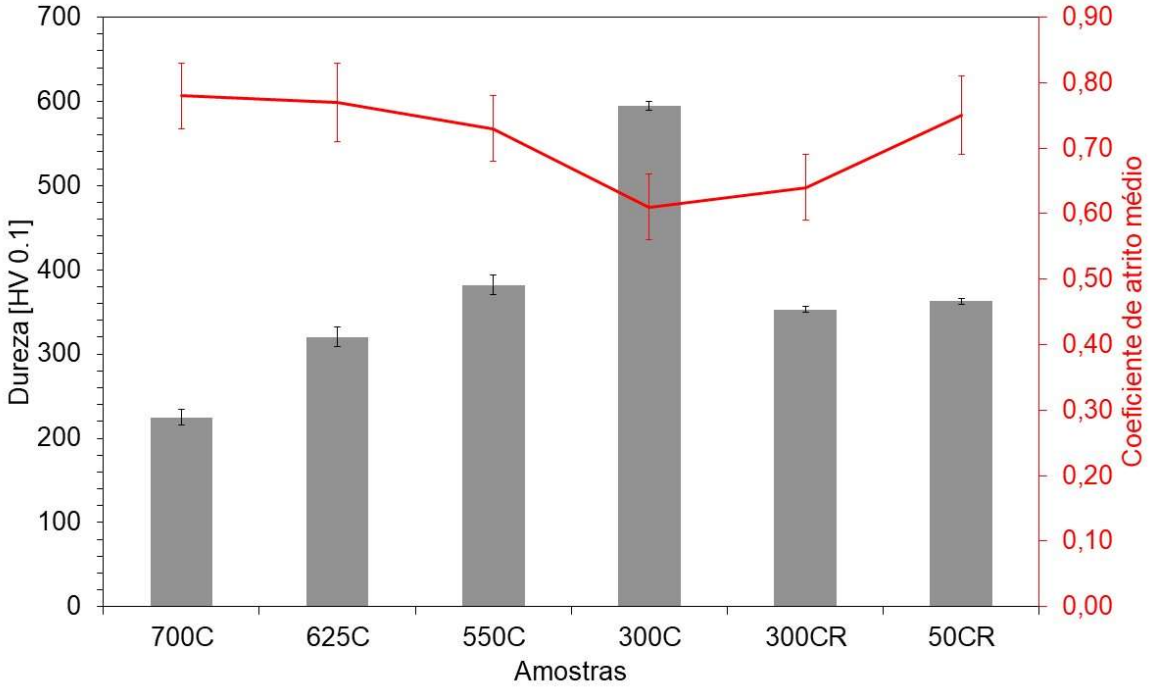
Figura 3.16. Percebe-se uma tendência de diminuição do coeficiente de atrito com o aumento da dureza do material do pino para os ensaios de desgaste do tipo pino contra disco.

Para comparar os valores de coeficiente de atrito médio encontrados para essa série de ensaios foram aplicados testes F do método da análise da variância (ANOVA) (COSTA NETO, 2002). Ao nível de 10% de significância os valores encontrados para as amostras perlíticas (700C, 625C e 550C) e para as amostras bainíticas (300C e 300CR) são estatisticamente iguais entre si. Porém comparando os resultados de microestruturas diferentes, percebe-se que o coeficiente de atrito das amostras perlíticas tende a ser maior do que o coeficiente encontrado nos ensaios com as amostras bainíticas apresentando diferenças significativas mesmo ao nível de 1% de significância.

Tabela 3.8 – Média do coeficiente de atrito em função do tratamento térmico dos pinos após o período de *running-in* (aproximadamente 300 metros de deslizamento) nos ensaios de desgaste pino contra disco.

Amostra	Coeficiente de atrito [μ]
700C	0,78 ± 0,05
625C	0,77 ± 0,06
550C	0,73 ± 0,05
300C	0,61 ± 0,05
300CR	0,64 ± 0,05
50CR	0,75 ± 0,06

Figura 3.16 - Coeficiente de atrito médio após etapa de *running-in* em função da dureza de cada microestrutura nos ensaios pino contra disco com material modelo.



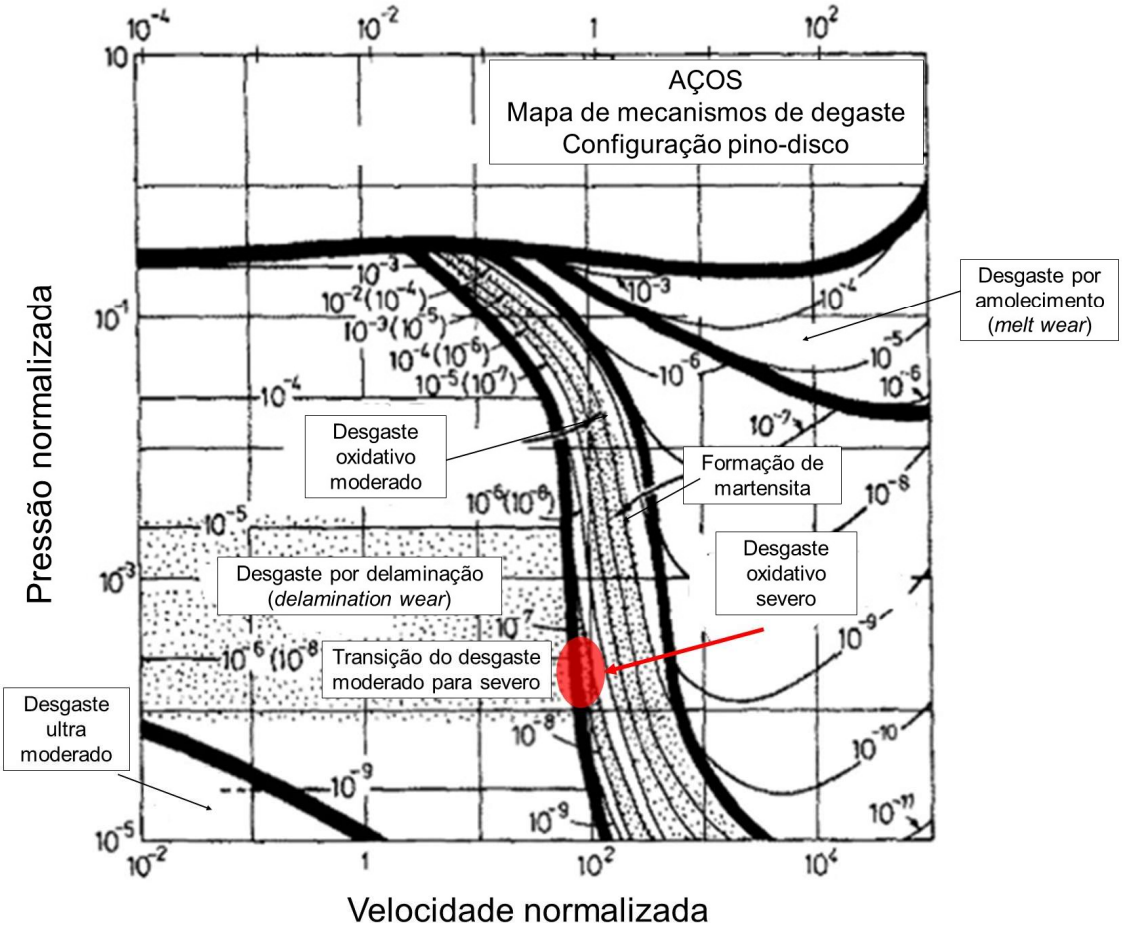
Os valores de pressão normalizada e velocidade normalizada para cada amostra foram inseridos no mapa dos mecanismos de desgaste para a configuração pino contra disco elaborado por Lim e Ashby (1987) conforme apresentado e discutido na seção 2.2.1 – Desgaste por deslizamento e na Figura 2.12. Os valores calculados para pressão normalizada, velocidade normalizada e taxa de desgaste normalizada são apresentados na Tabela 3.9. Para a realização dos cálculos foram considerados os seguintes valores: 0,8 MPa pressão de contato, 0,5 m/s velocidade de deslizamento e 9,1 x 10^{-6} m^2/s sendo a difusividade térmica do aço (LIM; ASHBY, 1987).

Observa-se que os ensaios de desgaste pino contra disco utilizando material modelo estão na região onde o mecanismo de desgaste oxidativo (regime moderado) é dominante segundo indicado em vermelho na Figura 3.17.

Tabela 3.9 – Valores normalizados de pressão, velocidade e taxa de desgaste para os ensaios de desgaste com configuração pino contra disco para o material modelo.

Amostra	Dureza [HV]	Pressão normalizada [10^{-4}]	Velocidade normalizada [10^{2}]	Taxa de desgaste [mm^3/m] [10^{-3}]	Taxa de desgaste normalizada [10^{-5}]
700C	225	3,74	1,10	0,29	2,31
625C	320	2,63	1,10	0,16	1,27
550C	382	2,20	1,10	0,09	0,72
300C	594	1,42	1,10	0,28	2,23
300CR	353	2,39	1,10	0,19	1,51
50CR	363	2,32	1,10	0,24	1,91

Figura 3.17 - Mapa dos mecanismos de desgaste para configuração pino contra disco para material modelo.



Fonte: Autora e adaptado de Lim e Ashby (1987).

Nas próximas figuras (Figura 3.18, Figura 3.19 e Figura 3.20) são visualizadas seções longitudinais, perpendiculares às superfícies de desgaste, após os ensaios do tipo pino contra disco nos pinos 300C, 300CR e 50CR nessa

ordem. As imagens foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura com detector SE (elétrons secundários).

Nessas micrografias observa-se uma região adjacente à superfície de ensaio de aproximadamente 10 µm de espessura apresentando deformação severa. Não foram notadas trincas subsuperficiais, essa escassez de trincas se deve à baixa pressão de contato resultante no ensaio e a predominância do regime de desgaste oxidativo moderado.

Figura 3.18 - Amostra 300C – Bainita inferior. 594 HV. - Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do pino de material modelo proveniente do ensaio pino contra disco. a) SE - 10.000x b) SE - 15.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).

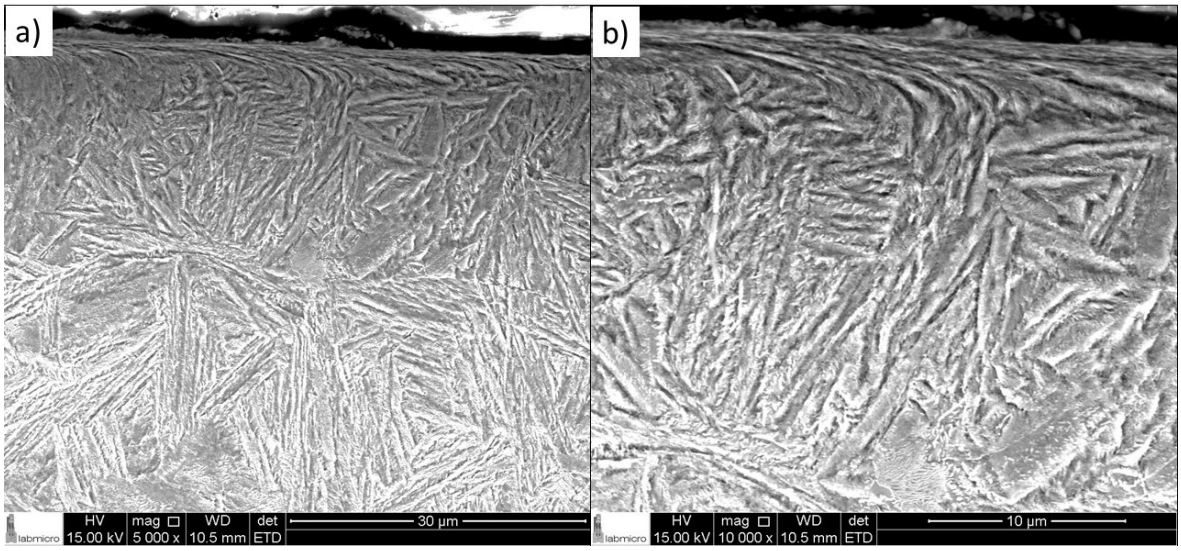


Figura 3.19 - Amostra 300CR – Bainita revenida. 353 HV. - Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do pino de material modelo proveniente do ensaio pino contra disco. a) SE -10.000x b) SE - 15.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).

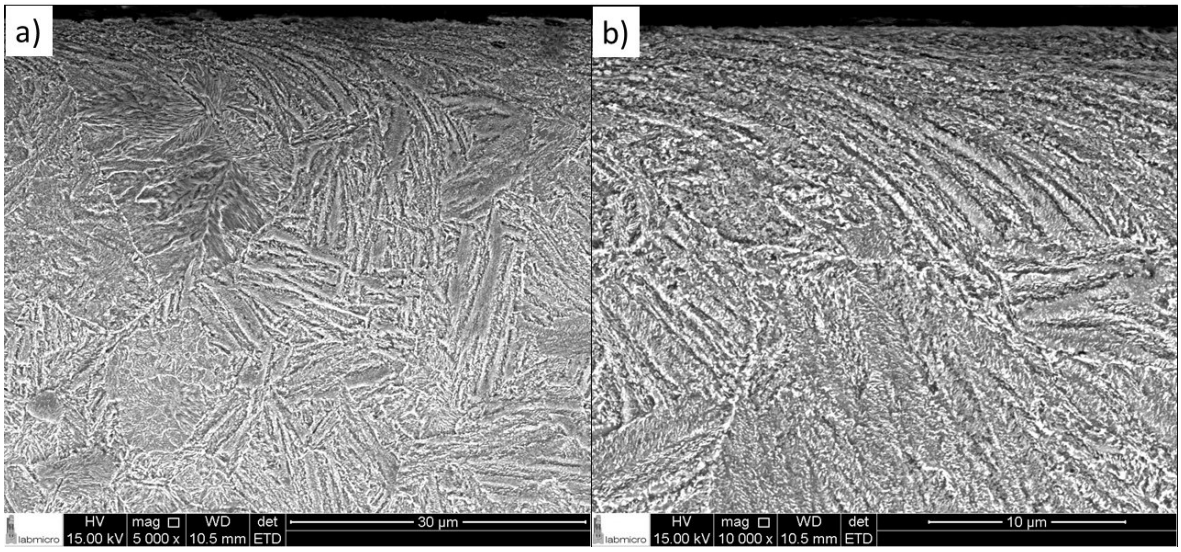
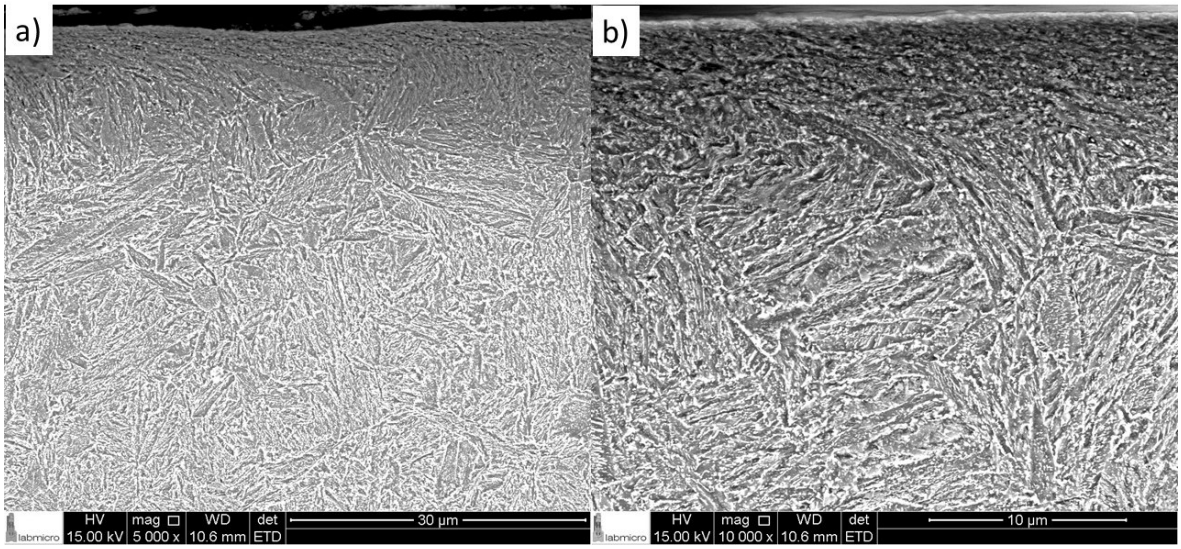


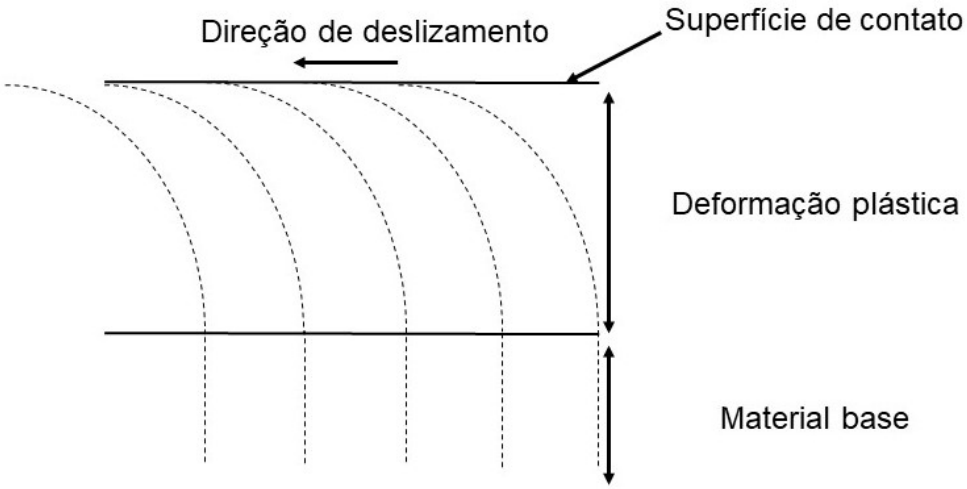
Figura 3.20 – Amostra 50CR – Martensita revenida. 363 HV. - Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do pino de material modelo proveniente do ensaio pino contra disco. a) SE - 10.000x b) SE - 5.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



Após os ensaios pino contra disco, todos os pinos apresentaram na seção perpendicular à superfície uma camada plasticamente deformada seguindo a direção de deslizamento, sendo maior a deformação quanto mais próxima da superfície de ensaio. Na Figura 3.21 é apresentado um desenho esquemático da deformação da microestrutura. A partir desse esquema nota-se que existe uma

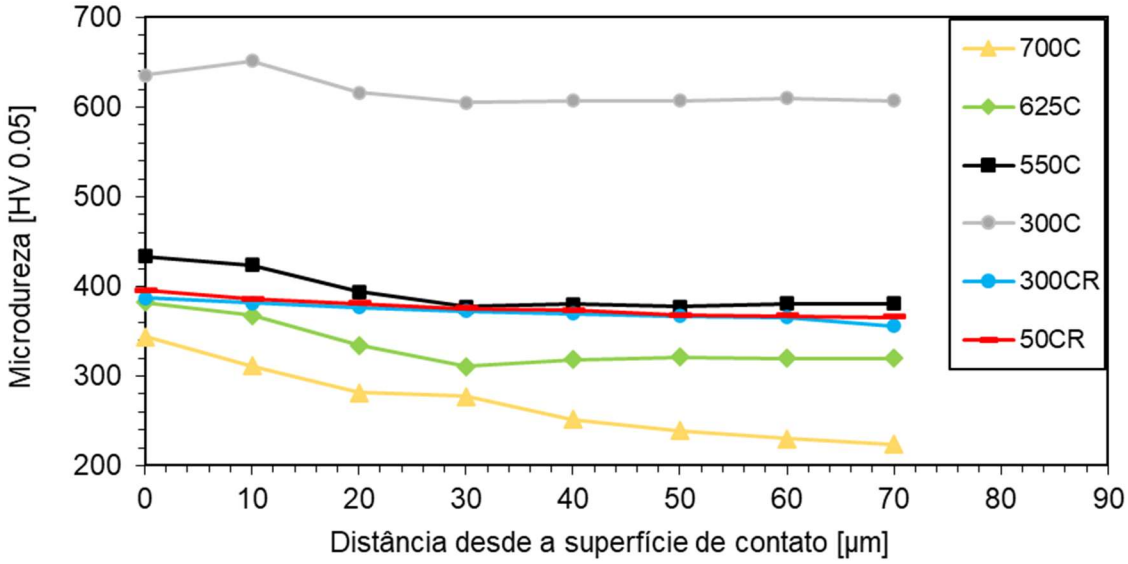
interface entre a região plasticamente deformada e o material base onde pode-se estabelecer a profundidade de deformação.

Figura 3.21 – Desenho esquemático da camada deformada encontrada na seção perpendicular à superfície dos pinos após ensaios pino contra disco.



Na Figura 3.22 encontram-se os valores médios da microdureza dos pinos em função da distância desde a superfície de contato desgastada. Todos os pinos apresentaram uma elevação da dureza nas regiões próximas à superfície de desgaste. Nas amostras puramente perlíticas (700C, 625C e 550C), esse aumento ocorreu devido ao endurecimento da ferrita, fragmentação da cementita e redução do espaçamento interlamelar da perlita (CHAVES, 2017).

Figura 3.22 - Variação da microdureza dos pinos em função da distância desde a superfície de contato com o disco (superfície desgastada nos ensaios pino contra disco).



Fonte: Os dados das amostras 700C, 625C e 550C foram adaptados de Chaves (2017).

A perlita com menor dureza (amostra 700C) obteve o maior encruamento superficial quando comparada com as outras microestruturas. Assim pressupõe-se que a capacidade de encruamento da perlita diminui com a redução do espaçamento interlamelar, ou seja, microestruturas perlíticas formadas em maiores temperaturas (maiores espaçamentos interlamelares) encruam mais quando comparadas às formadas em temperaturas inferiores (CHAVES, 2017).

Na Tabela 3.10 são apresentados os valores de microdureza medidos nos pinos em função da distância desde a superfície de desgaste e os respectivos aumentos percentuais em relação à microdureza inicial do material antes dos ensaios de desgaste por deslizamento puro. As amostras perlíticas apresentaram maior aumento da dureza superficial, desde 14% (amostra 550C) até 53% (amostra 700C), maior aumento quando comparadas às amostras bainíticas e martensíticas (7% até 10% de aumento). A espessura da camada deformada também variou conforme a microestrutura, por exemplo, a camada deformada mais espessa (50 µm) correspondeu às amostras com microestrutura de perlita grosseira (700C). Conclui-se assim que a perlita tem maior capacidade de encruamento do que a bainita.

Tabela 3.10 – Variação da microdureza dos pinos em função da distância desde a superfície de contato com o disco.

Amostra	Distância desde a superfície de contato [µm]							
	0	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**
	Valores em HV [% de aumento em relação à dureza inicial]							
700C	344 [53%]	312 [39%]	282 [25%]	277 [24%]	252 [12%]	239 [7%]	230 [2%]	224 [0%]
625C	382 [19%]	368 [15%]	335 [4%]	311 [-3%]	319 [-1%]	321 [0%]	320 [0%]	320 [0%]
550C	434 [14%]	424 [11%]	394 [3%]	377 [-1%]	380 [0%]	377 [-1%]	381 [0%]	381 [0%]
300C	635 [7%]	652 [10%]	616 [4%]	605 [2%]	607 [2%]	607 [2%]	610 [3%]	607 [1%]
300CR	387 [10%]	381 [8%]	377 [7%]	373 [6%]	370 [5%]	367 [4%]	365 [3%]	356 [1%]
50CR	395 [9%]	386 [6%]	381 [5%]	375 [3%]	373 [3%]	368 [1%]	367 [1%]	365 [1%]

Os principais resultados consolidados dos ensaios pino contra disco com material modelo são apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Resultados consolidados dos ensaios pino contra disco com pinos de material modelo contra discos de aço H13.

Amostra	Dureza inicial [HV]	Dureza superficial final [HV]	Diferença percentual entre a dureza superficial final e inicial	Coeficiente de atrito médio	Espessura da camada deformada [µm]	Taxa de desgaste [mm^3/m] [10^{-3}]	Coeficiente de desgaste adimensional K_A [10^{-5}]	Microestrutura	Espaçamento interlamelar da perlita [nm]
700C	225	344	53%	0,78	50	0,29	6,12	Perlita grosseira	243
625C	320	382	19%	0,77	20	0,16	4,89	Perlita média	128
550C	382	434	14%	0,73	20	0,09	3,41	Perlita fina	70
300C	594	635	7%	0,61	20	0,28	15,68	Bainita inferior	-
300CR	353	387	10%	0,64	30	0,19	6,17	Bainita revenida	-
50CR	363	395	9%	0,75	20	0,24	8,39	Martensita revenida	-

Com os tratamentos isotérmicos realizados num dilatômetro de têmpera foram obtidas diversas microestruturas em um aço modelo (1080) que permitiram avaliar a resistência ao desgaste por deslizamento puro sem lubrificação de microestruturas similares às encontradas em rodas ferroviárias. As microestruturas obtidas foram: perlita com três espaçamentos lamelares (70 até 243 µm), bainita, bainita revenida e martensita revenida. As durezas das amostras variaram de 225 HV até 594 HV.

Notou-se uma tendência, com os dados obtidos nos ensaios de desgaste, das microestruturas com maior dureza apresentarem menor perda de massa conforme proposto na literatura. O coeficiente de atrito médio em regime permanente foi maior nos ensaios com microestruturas perlíticas em comparação aos ensaios com microestruturas bainíticas.

Colocando os valores encontrados no mapa de desgaste proposto por Lim e Ashby (1987), estima-se que os ensaios ocorreram no regime moderado apresentando mecanismo de desgaste oxidativo.

4 MÚLTIPLAS VIDAS DE UMA RODA FERROVIÁRIA

No transporte ferroviário, quando se trata de material rodante, os maiores custos de manutenção são devido às rodas ferroviárias. A correta manutenção e utilização adequada das rodas são fatores decisivos para a competitividade do setor. Depois de um período em operação, podem ocorrer trincas superficiais, defeitos ou perda de geometria nas rodas e por esses motivos, em rodas de múltiplas vidas, se faz necessário realizar o reperfilamento da roda (pista de rolamento e friso) com o objetivo de aumentar a vida útil. Estima-se que o aro de uma roda ferroviária de múltiplas vidas para aplicação *heavy haul* apresente 75 mm de espessura na primeira vida e 25 mm na última vida.

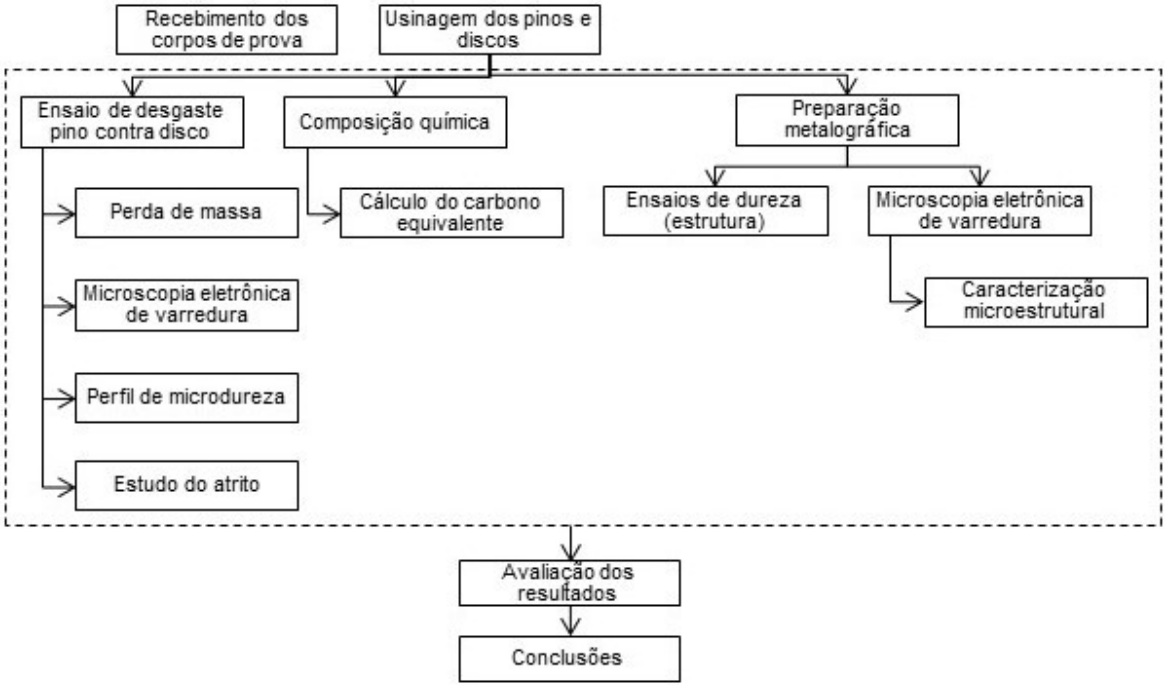
O objetivo principal do estudo apresentado nesse capítulo é compreender o comportamento de uma roda ferroviária microligada quanto ao desgaste por deslizamento puro, desgaste por rolamento com escorregamento variável e resistência à fadiga de contato por rolamento em cada uma de suas vidas. Esse capítulo é divido em duas seções correspondentes às configurações dos ensaios tribológicos utilizados, na seção 4.1 serão apresentados os ensaios pino contra disco (deslizamento puro) e na seção 4.2 os ensaios disco contra disco (desgaste por rolamento e fadiga de contato por rolamento). Em cada seção primeiramente serão descritos os materiais utilizados, os procedimentos de ensaios, os equipamentos e os métodos de análises. Em seguida, serão apresentados e discutidos os resultados encontrados, e por fim os principais resultados serão consolidados em formato de tabelas.

4.1 DESLIZAMENTO PURO

4.1.1 Materiais e métodos

Nessa primeira etapa foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento puro utilizando um tribômetro de configuração pino contra disco. O fluxograma das atividades e análises é apresentado na Figura 4.1.

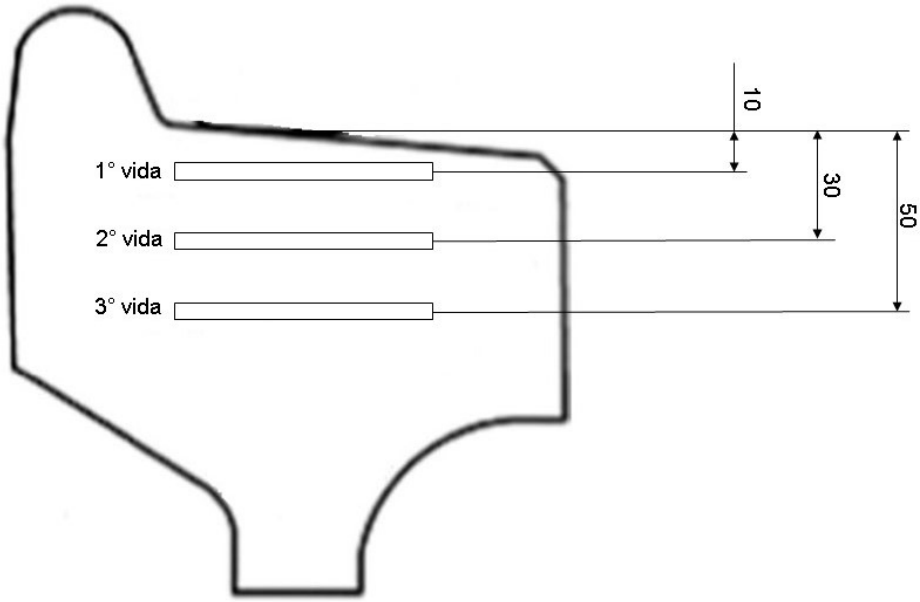
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas e ensaios para avaliação da resistência ao desgaste por deslizamento puro nas múltiplas vidas de uma roda ferroviária.



4.1.1.1 Amostras

Os pinos foram retirados do aro de uma roda ferroviária por meio do processo de eletroerosão a fio e em seguida usinados apenas no comprimento. A roda ferroviária utilizada é microligada fundida conforme a norma AAR M-107/M-208 classe D em condição nova fornecida pela AmstedMaxion – Cruzeiro SP. Os discos eram de aço H13 temperado e revenido da mesma forma que os utilizados na Seção 3.1 desse trabalho. Ambas as amostras foram confeccionadas nas dimensões apresentadas na Figura 3.2. A posição de retirada das amostras de rodas das múltiplas vidas é apresentada na Figura 4.2, a primeira vida foi definida como sendo a região mais próxima da pista de rolamento e a segunda e terceira vidas em regiões distantes 30 mm e 50 mm da pista de rolamento da roda respectivamente.

Figura 4.2 - Desenho esquemático da região de retirada dos pinos das múltiplas vidas de uma roda ferroviária microligada para realização de ensaios pino contra disco. Dimensões em mm.



As amostras das múltiplas vidas foram analisadas com técnicas de análise de composição química por espectrometria de emissão ótica, cálculo do carbono equivalente, medição de dureza da estrutura e caracterização microestrutura utilizando imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, conforme já detalhado nas seções 3.1.2 e 3.1.3.

4.1.1.2 Ensaios de desgaste por deslizamento puro

Os ensaios de deslizamento puro e a caracterização da superfície deformada pós-ensaio foram realizados seguindo os mesmos procedimentos anteriormente descritos na seção 3.1.4. Ensaiaram-se também cinco réplicas para cada amostra (vida).

4.1.2 Resultados e discussões

4.1.2.1 Composição química e carbono equivalente

Na Tabela 4.1 é apresentada a composição química das amostras de pino (roda) utilizadas nos ensaios pino contra disco. A concentração de cada elemento químico é informada em porcentagem em peso. Os valores encontrados estão dentro dos limites admitidos pela norma AAR para rodas ferroviárias classe D

(Tabela 2.2) e quanto à concentração de microligantes atendem a Equação 1. A composição química dos discos de material H13 é idêntica aos limites apresentados na Tabela 3.4.

Com a utilização da Equação 6, a amostra de roda ferroviária fundida microligada apresentou um teor de carbono equivalente igual a 0,9315% correspondente a um aço hipereutetoide.

Tabela 4.1 - Composição química das amostras de roda ferroviária utilizadas nos ensaios pino contra disco: múltiplas vidas de uma roda ferroviária.

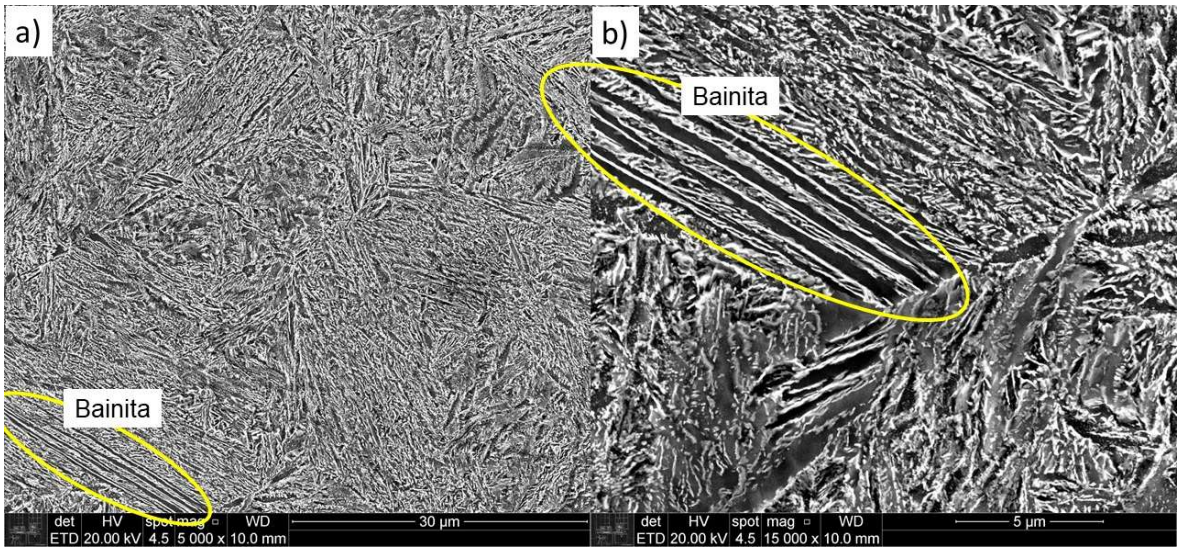
Concentração química [%p]	
Carbono = 0,7400	Nitrogênio = 0,0046
Silício = 0,7000	Manganês = 0,7200
Enxofre = 0,0130	Fósforo = 0,0170
Cromo = 0,2610	Cobre = 0,0240
Estanho = 0,0020	Níquel = 0,0200
Molibdênio = 0,0770	Nióbio = 0,0010
Alumínio = 0,0095	Chumbo = 0,0001
Titânio = 0,0020	Vanádio = 0,0050
Boro = 0,0001	Tungstênio = 0,0000

4.1.2.2 Caracterização microestrutural

O aspecto da microestrutura encontrada na primeira vida da roda ferroviária (10 mm desde a pista de rolamento) é exibido na Figura 4.3. Nota-se uma estrutura homogênea composta principalmente de bainita. As agulhas de bainita possuem um comprimento aproximado de até 25 μm, sendo que os carbonetos precipitados dentro da bainita apresentam dimensões nanométricas.

Pela morfologia é possível notar que a bainita que compõe essa região é semelhante à bainita revenida caracterizada no capítulo anterior (amostra 300CR - Figura 3.11). Porém a amostra 300CR apresentou 353 HV, valor esse inferior ao encontrado para a amostra de primeira vida de roda ferroviária (389 HV). A bainita da amostra 300CR obteve um engrossamento mais acentuado dos carbonetos, enquanto na amostra de 1° vida ainda são mais evidentes as agulhas de bainita.

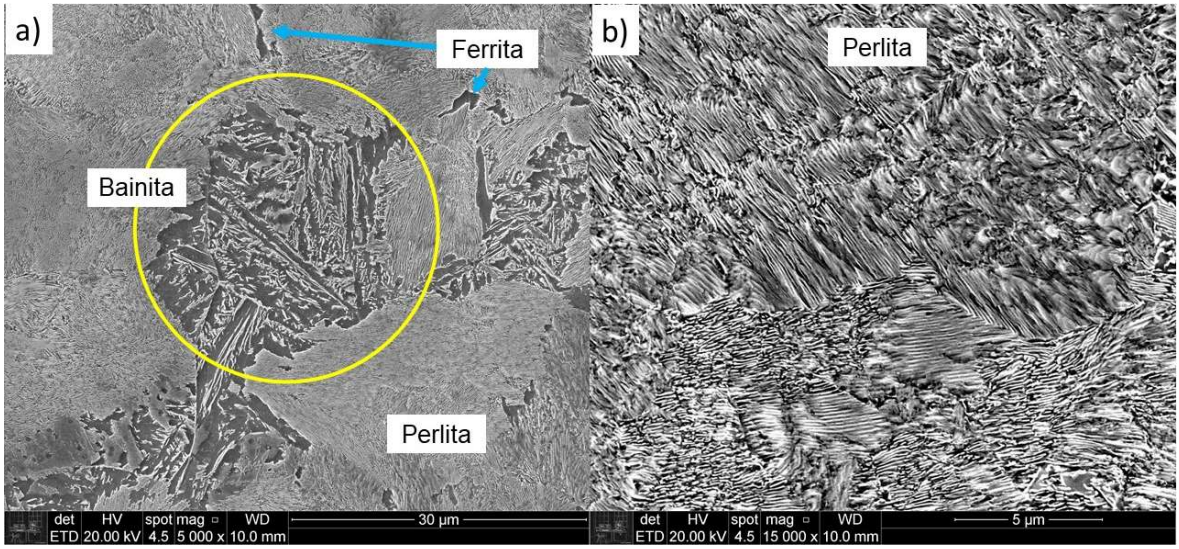
Figura 4.3 - Aspecto da microestrutura encontrada na roda analisada em sua 1° vida distante 10 mm desde a pista de rolamento. a) SE - 5.000x b) SE - 15.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A Figura 4.4 mostra a microestrutura na segunda vida (30 mm desde a pista de rolamento), onde se percebe uma estrutura heterogênea complexa, composta de perlita, bainita e ferrita nos contornos de grão sendo que a matriz é perlítica. A bainita apresenta agulhas de até 20 µm de comprimento e dentro dessas verifica-se a precipitação de carbonetos de dimensões manométricas. O espaçamento interlamelar da perlita estimado é de 73 ± 7 nm. Esse espaçamento é equivalente ao encontrado nas amostras de aço 1080 tratadas isotermicamente a 550 °C.

Para estimar a fração volumétrica de bainita na estrutura, foram utilizadas imagens obtidas por MEV de seis regiões distintas da amostra para realização de cálculos conforme previsto na norma ASTM E562-11. No software ImageJ foram traçadas malhas com campos 10 x 10 sobre as micrografias. Para o cálculo foi empregado um intervalo de 95% de confiança (ASTM E562-11, 2011). Estima-se que a bainita corresponda à fração de 21,4 ± 6,9% em volume da estrutura, assim pressupõe-se que a matriz da estrutura é perlítica.

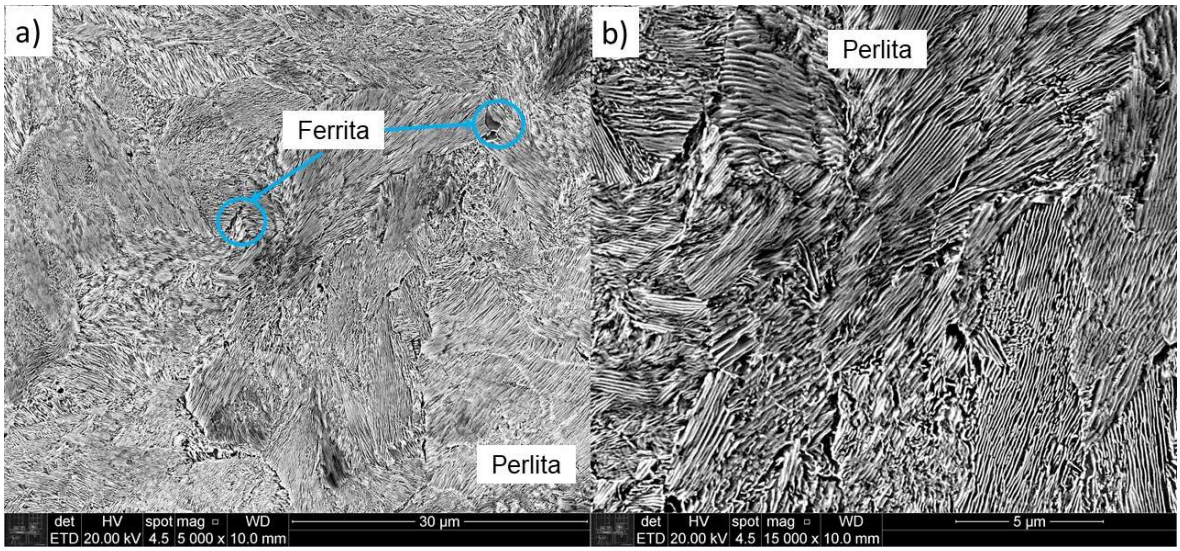
Figura 4.4 - Aspecto da microestrutura encontrada na roda analisada em sua 2° vida distante 30 mm desde a pista de rolamento. a) SE - 5.000x b) SE - 15.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



Na terceira vida da roda ferroviária foi encontrada a microestrutura da Figura 4.5 (50 mm desde a pista de rolamento) predominantemente perlítica com indícios de ferrita proeutetoide em contorno de grão (indicada pelas setas e círculos azuis na figura). O espaçamento perlítico calculado foi de 93 ± 8 nm.

A presença de ferrita proeutetoide tem influência no comportamento ao desgaste devido à sua menor dureza e por promover heterogeneidades na estrutura. Sabe-se que uma a mistura de microestruturas com diferentes durezas (duras e macias) é mais propensa à nucleação e propagação de trincas (GAO et al., 2019).

Figura 4.5 - Aspecto da microestrutura encontrada na roda analisada em sua 3° vida distante 50 mm desde a pista de rolamento. a) SE - 5.000x b) SE - 15.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A microestrutura encontrada e os valores de microdureza Vickers para as amostras das múltiplas vidas (pinos) e do aço H13 (discos) são apresentadas na Tabela 4.2. Devido ao tratamento térmico de revenido ao qual as rodas ferroviárias são submetidas após o processo de resfriamento diferencial na pista de rodagem, as regiões de primeira e segunda vidas provavelmente foram afetadas e tiveram uma redução das tensões internas e da dureza.

Na

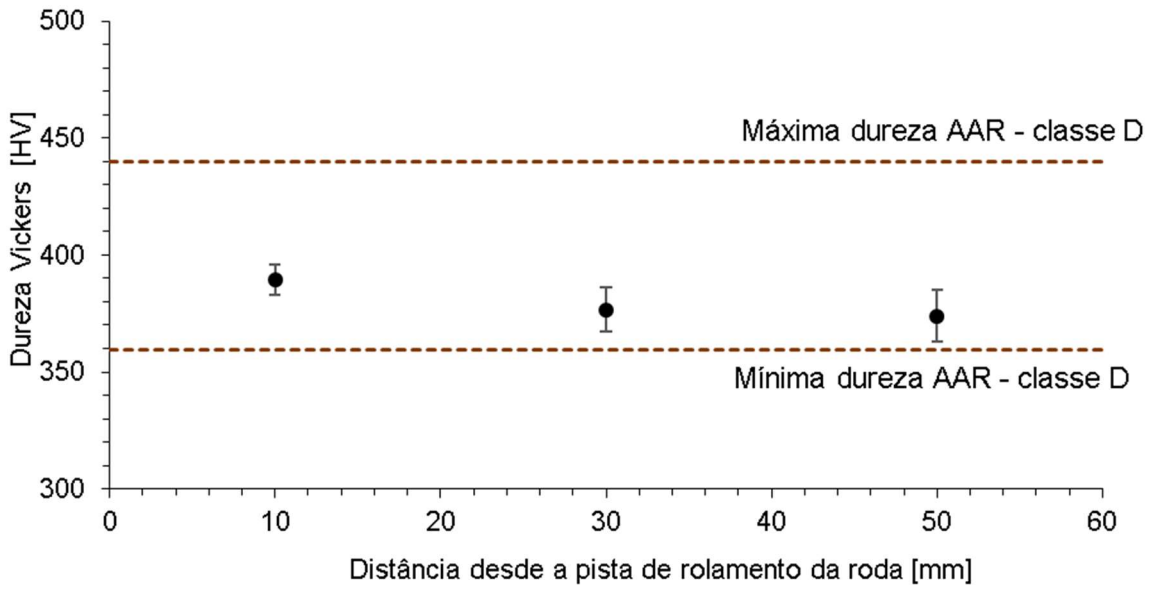
Figura 4.6 esses valores são ilustrados em função da distância desde a pista de rolamento e percebe-se que estão dentro da faixa de valores recomendados pela norma AAR. A norma AAR utiliza microdureza Brinell HB que foi convertida para microdureza Vickers apenas para ilustrar a faixa recomendada (E140−02, 2002).

Aplicando testes F do método da análise da variância (ANOVA) (COSTA NETO, 2002) para testar igualdade entre médias, verificou-se que ao nível de 10% de significância, os valores de dureza Vickers média não apresentaram diferenças significativas entre a segunda e terceira vidas. Porém as amostras de primeira vida (microestrutura bainítica) apresentaram diferenças significativas quando comparadas com as outras duas vidas.

Tabela 4.2 – Dureza e microestrutura dos pinos de múltiplas vidas de uma roda ferroviária e discos de aço H13.

Corpo de prova	Amostra	Distância desde a pista de rolamento [mm]	Dureza pinos [HV]	Microestrutura
Pino	**1° vida**	10	389 ± 7	Bainita
Pino	**2° vida**	30	377 ± 10	Bainita + Perlita
Pino	**3° vida**	50	374 ± 11	Perlita
Disco	**H13**	-	627 ± 14	-

Figura 4.6 – Microdureza Vickers em função da distância desde a pista de rolamento de uma roda ferroviária classe D (múltiplas vidas).



4.1.2.3 Ensaios de desgaste por deslizamento

A perda de massa dos pinos foi medida em todos os ensaios de desgaste por deslizamento puro por meio da diferença entre as massas inicial e final de cada amostra. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de perda de massa para cada amostra e na Figura 4.7 esses valores são comparados com a dureza Vickers de cada microestrutura por meio de um gráfico. Verifica-se que a primeira vida (bainita), mesmo possuindo uma dureza superior, apresenta o dobro de perda de massa quando comparada às outras amostras.

O valor médio de perda de massa das microestruturas perlíticas foi próximo ao encontrado no capítulo anterior para perlita fina com dureza de 381 HV, a

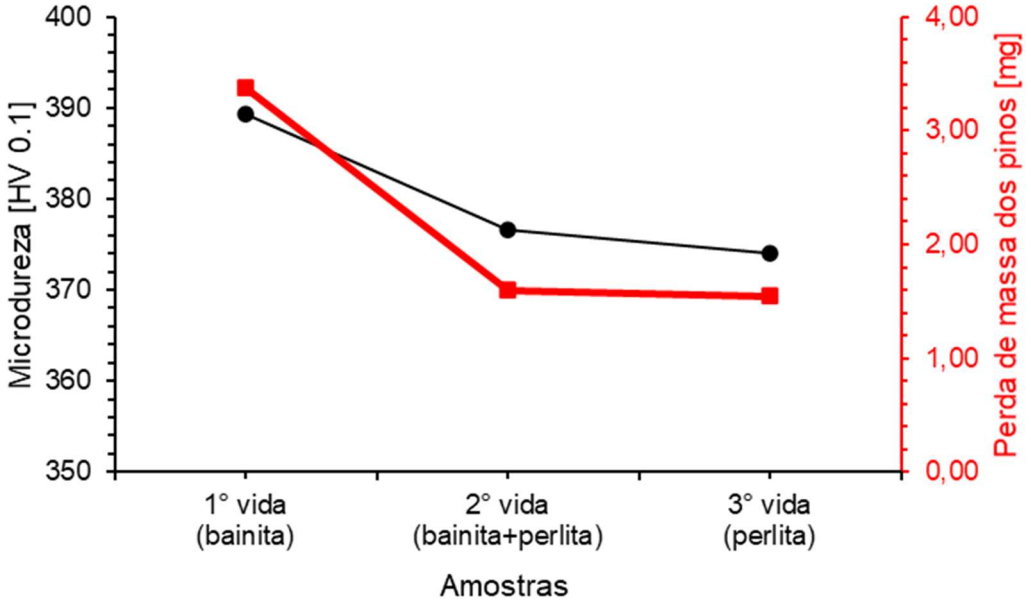
amostra 500C apresentou 1,34 mg de perda de massa (Tabela 3.6). No entanto, a amostra com microestrutura de bainita revenida com dureza ligeiramente inferior (353 HV) obteve apenas 2,62 mg de perda de massa (Tabela 3.6), valor esse inferior ao observado para amostra de 1° vida (3,38 mg).

Aplicando testes F do método da análise da variância (ANOVA) para testar estatisticamente a igualdade entre médias (COSTA NETO, 2002), verificou-se que ao nível de 5% de significância os valores calculados de perda de massa média dos pinos não apresentaram diferenças significativas entre a segunda e terceira vidas (microestruturas perlíticas). Porém a primeira vida (microestrutura bainítica) apresentou diferença significativa ao nível de 1% de significância quando comparada com as outras duas vidas. Já os valores de perda de massa média dos discos são todos estatisticamente iguais, mesmo a um nível de 10% de significância.

Tabela 4.3 - Perda de massa dos pinos e discos após ensaios de desgaste por deslizamento das múltiplas vidas de uma roda ferroviária microligada.

Amostra	**Dureza pinos [HV]**	**Perda de massa dos pinos [mg]**	**Perda de massa dos discos [mg]**
1° vida	389 ± 7	3,38 ± 0,19	0,88 ± 0,47
2° vida	377 ± 10	1,59 ± 0,33	0,86 ± 0,31
3° vida	374 ± 11	1,55 ± 0,66	0,86 ± 0,40

Figura 4.7 - Perda de massa após os ensaios de desgaste por deslizamento puro e dureza dos pinos de múltiplas vidas de uma roda ferroviária microligada.



Na Tabela 4.4 são apresentados os valores de coeficiente de desgaste adimensional (coeficiente de Archard) para as múltiplas vidas. Observa-se que na primeira vida o valor desse coeficiente é mais que o dobro do valor nas demais vidas. O coeficiente adimensional $\mathbf{K_A}$ proposto por Archard (1953) (Equação 2) é uma relação entre a perda de massa, dureza do material, carga normal e distância de deslizamento para um ensaio de desgaste por deslizamento puro.

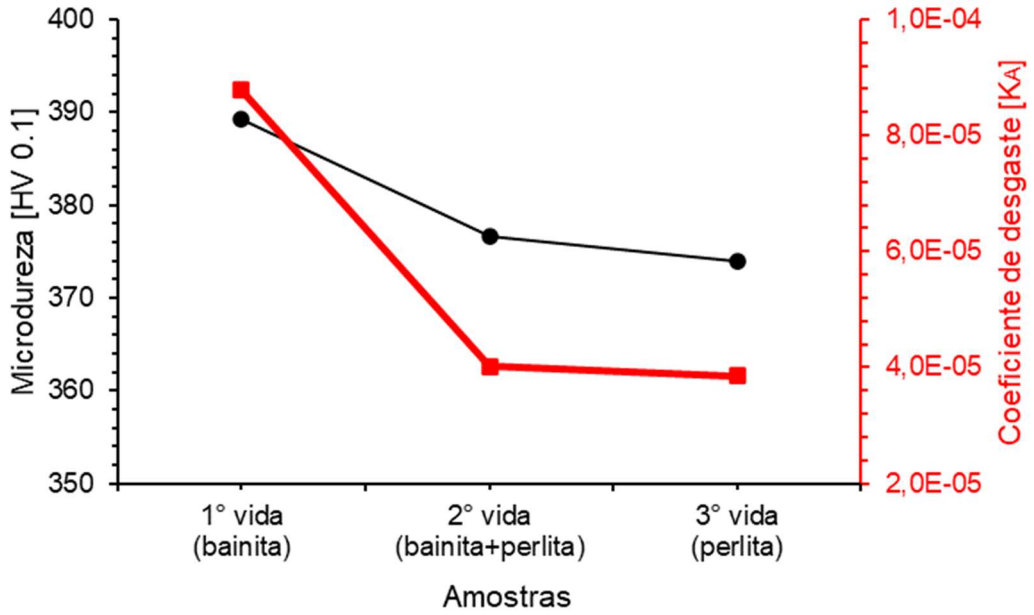
Como a dureza das três estruturas analisadas são muito similares e a carga normal e a distância de deslizamento são idênticas para todas as condições de ensaio, o coeficiente de desgaste de Archard varia nesse estudo principalmente com a taxa de desgaste. Conforme apresentado na

Figura 4.8, observa-se uma tendência do coeficiente de desgaste adimensional $\mathbf{K_A}$ diminuir nas microestruturas com menores valores de dureza. Porém o maior desgaste da amostra de primeira vida (microestrutura bainítica) não pode ser explicado pelo valor de dureza inicial pois contradiz o senso comum que os aços com maior dureza exibem menor desgaste conforme a lei de Archard. Provavelmente, esta discrepância está associada a outras variáveis tais como o encruamento e as características da própria microestrutura.

Tabela 4.4 - Coeficiente de desgaste K_A em função das múltiplas vidas de uma roda ferroviária.

Amostra	Dureza [HV]	Força normal [N]	Perda de massa do material mais mole [mg]	Taxa de desgaste [mm^3/m] [10^{-3}]	Coeficiente de desgaste adimensional K_A [10^{-5}]
1° vida	389	10,38	3,38	0,24	8,77
2° vida	377	10,38	1,59	0,11	4,01
3° vida	374	10,38	1,55	0,11	3,86

Figura 4.8 – Valores da microdureza e do coeficiente de desgaste para as múltiplas vidas de uma roda ferroviária após os ensaios de desgaste por deslizamento puro.



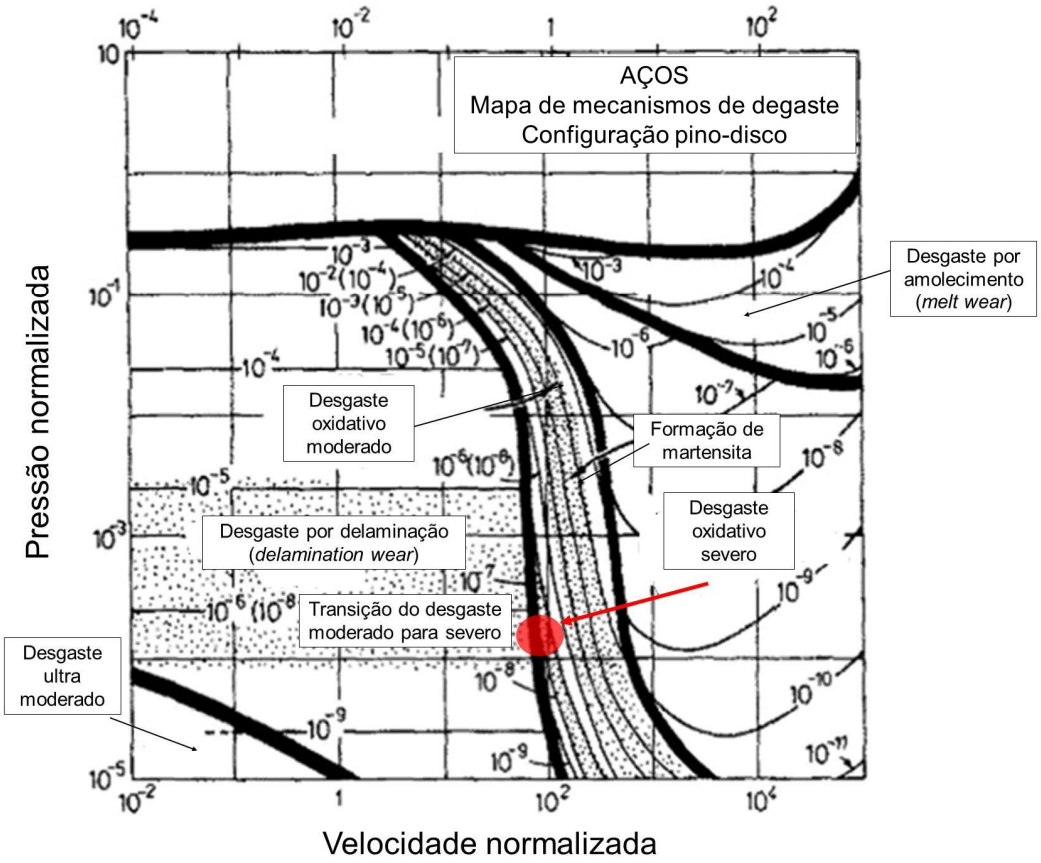
Para indicar quais foram os mecanismos de desgaste observados nos ensaios de configuração pino contra disco para as múltiplas vidas de uma roda ferroviária fundida microligada, os valores de velocidade normalizada e pressão normalizada foram inseridos no mapa dos mecanismos de desgaste proposto por Lim e Ashby (1987), conforme já apresentado e discutido na seção 2.2.1 – Desgaste por deslizamento. Os valores calculados para pressão normalizada, velocidade normalizada e taxa de desgaste normalizada são apresentados na Tabela 4.5. Para a realização dos cálculos foram considerados os seguintes valores: 0,5 m/s velocidade de deslizamento, 9,1 x 10^{-6} m^2/s sendo a difusividade térmica do aço (LIM; ASHBY, 1987) e 0,8 MPa pressão de contato.

Tabela 4.5 – Valores normalizados de pressão, velocidade e taxa de desgaste para os ensaios de desgaste com configuração pino contra disco para as múltiplas vidas de uma roda ferroviária fundida microligada.

Amostra	Dureza [HV]	Pressão normalizada [10^{-4}]	Velocidade normalizada [10^{2}]	Taxa de desgaste [mm^3/m] [10^{-3}]	Taxa de desgaste normalizada [10^{-5}]
1° vida	389	2,16	1,10	0,24	1,91
2° vida	377	2,23	1,10	0,11	0,88
3° vida	374	2,25	1,10	0,11	0,88

Os ensaios estão inseridos na região onde o mecanismo de desgaste oxidativo em regime moderado é dominante conforme ilustrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Mapa dos mecanismos de desgaste para configuração pino contra disco para as múltiplas vidas de uma roda ferroviária fundida microligada.



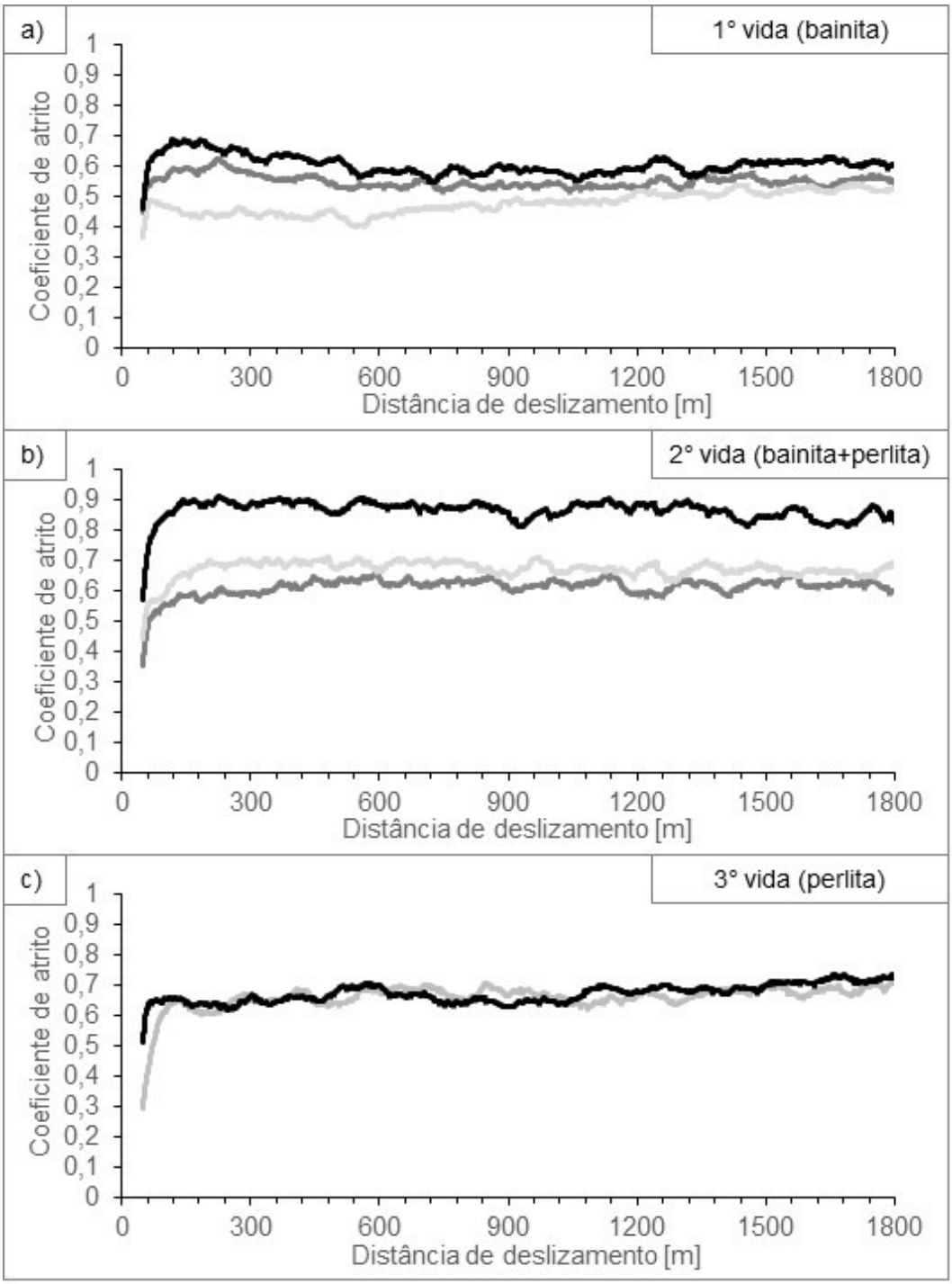
Fonte: Autora e adaptado de Lim e Ashby (1987).

A Figura 4.10 mostra as curvas de coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento nos ensaios pino contra disco para as réplicas de roda ferroviária de 1°, 2° e 3° vidas. Estima-se que o período de *running-in* do ensaio

seja de aproximadamente 300 metros de deslizamento, distância similar ao observado no estudo de resistência ao desgaste por deslizamento puro de um material modelo – aço (Figura 3.15).

Após essa etapa o coeficiente de atrito tende a permanecer constante e supõe-se que o sistema atingiu o regime permanente. No período de *running-in* em todos os ensaios, o coeficiente de atrito no início apresentou um valor menor e aumentou em função do tempo de ensaio até um valor máximo ($\mu_{máx}$), em seguida decaiu até se aproximar de um valor constante (μ_{ss}) conforme observado por Blau (1981).

Figura 4.10 - Curvas do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento nos ensaios pino contra disco. a) 1°vida, b) 2° vida e c) 3° vida.



O coeficiente de atrito médio e o desvio padrão amostral, após a etapa de *running-in*, em função da dureza da microestrutura nos ensaios de desgaste pino contra disco são visualizados na Tabela 4.6. O maior desvio padrão amostral encontrado nas amostras de segunda vida pode ser relacionado ao fato de heterogeneidades na estrutura promoverem maior instabilidade no coeficiente de

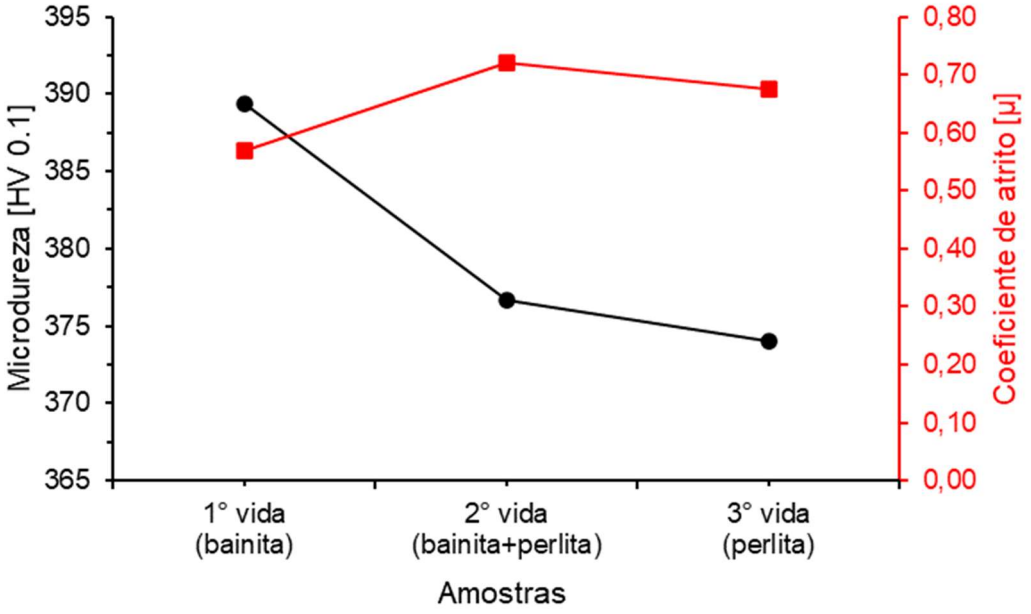
atrito. Percebe-se uma leve tendência de redução do coeficiente de atrito médio com o aumento da dureza (

Figura 4.11). Aplicando testes F do método da análise da variância (ANOVA) para testar a igualdade entre médias (COSTA NETO, 2002), os valores de coeficiente de atrito médio para a segunda e terceira vidas não apresentaram diferenças significativas entre eles ao nível de 5% de significância. Porém o valor de coeficiente de atrito médio para primeira vida (microestrutura bainítica) apresentou diferença significativa para as demais vidas mesmo ao nível de 1% de significância.

Tabela 4.6 – Coeficiente de atrito em função das múltiplas vidas de uma roda ferroviária após o período de *running-in* nos ensaios de desgaste pino contra disco

Amostra	Dureza [HV]	Coeficiente de atrito
1° vida	389	0,57 ± 0,07
2° vida	377	0,72 ± 0,13
3° vida	374	0,68 ± 0,01

Figura 4.11 - Coeficiente de atrito médio após etapa de running-in em função da dureza da microestrutura nos ensaios pino contra disco.



O aspecto da superfície de desgaste dos pinos de múltiplas vidas de uma roda ferroviária após os ensaios pino contra disco é apresentado na Figura 4.12 para a 1° vida, na Figura 4.13 para a 2° vida e na Figura 4.14 para a 3° vida. Para

todas as vidas, duas imagens de MEV são exibidas: uma obtida pelo modo de elétrons secundários (SE) e outra pelo modo de elétrons retroespalhados (BSC). O modo SE para observar aspectos topográficos da superfície (relevo) e o BSC para caracterizar qualitativamente regiões com óxidos.

Figura 4.12 - Aspecto da superfície dos pinos de 1° vida da roda ferroviária estudada após os ensaios de desgaste por deslizamento. a) SE b) BSC.

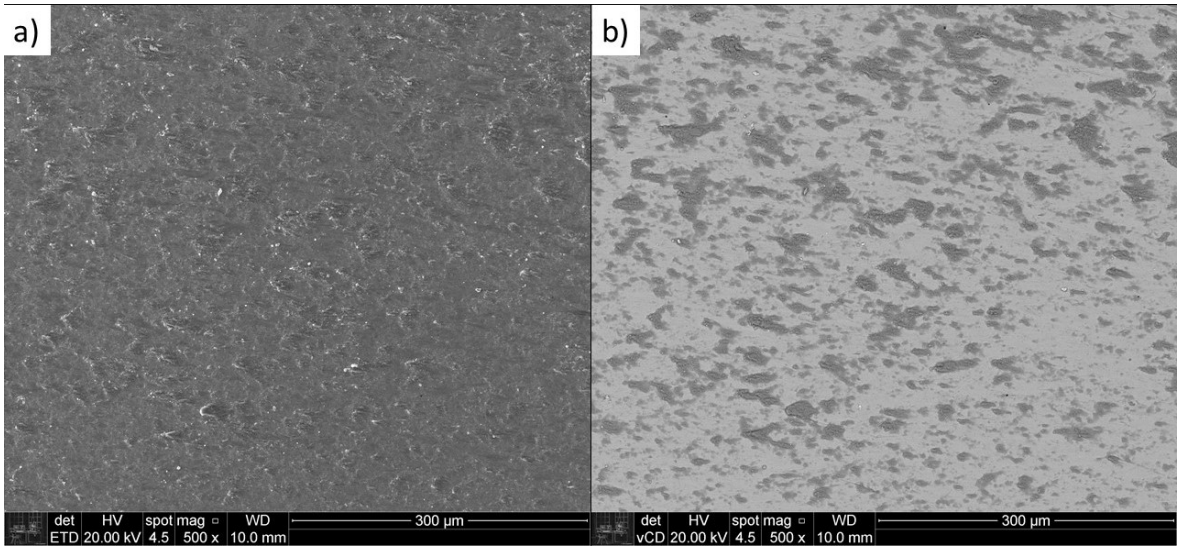


Figura 4.13 - Aspecto da superfície dos pinos de 2° vida da roda ferroviária estudada após os ensaios de desgaste por deslizamento. a) SE b) BSC.

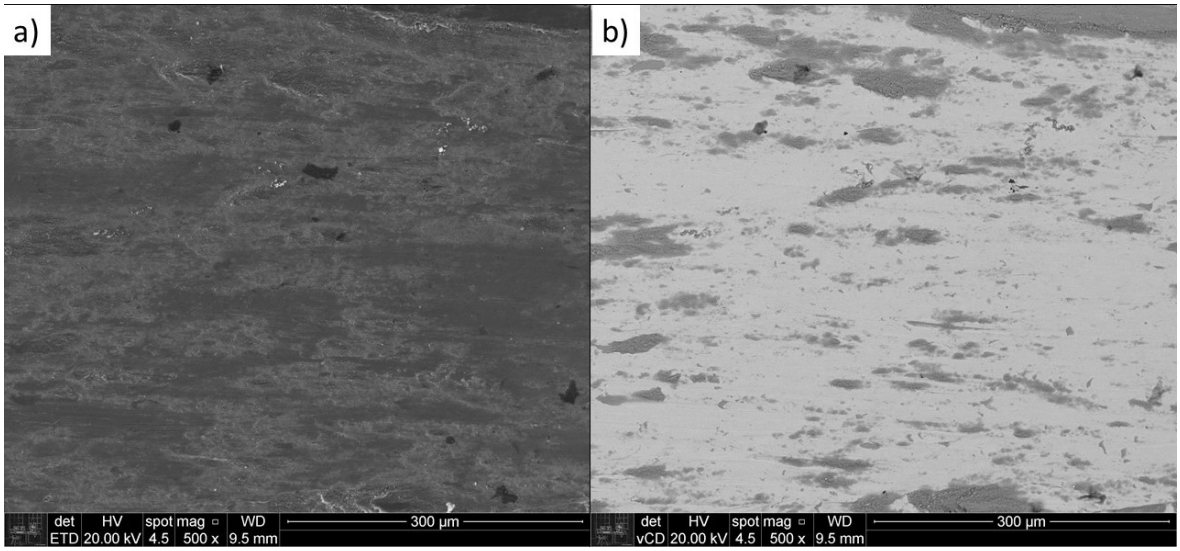
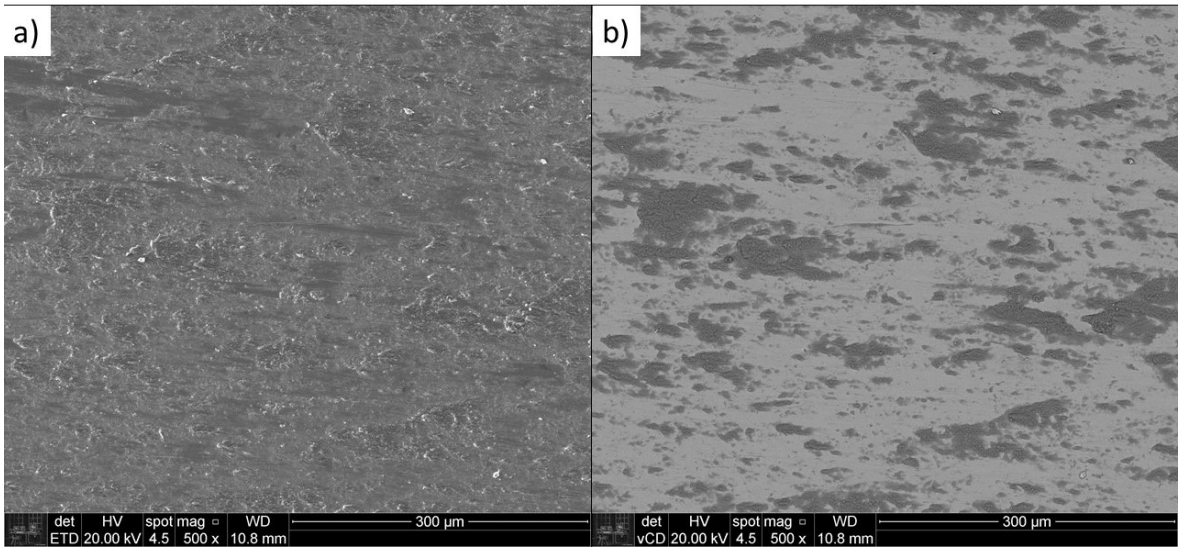


Figura 4.14 - Aspecto da superfície dos pinos de 3° vida da roda ferroviária estudada após os ensaios de desgaste por deslizamento. a) SE b) BSC.



Em todas as amostras foram encontradas evidências de adesão na superfície e a presença de óxidos (regiões escuras no modo de elétrons retroespalhados - BSC). Aparentemente a camada de óxido aumenta de espessura entre a primeira e a terceira vida, na terceira vida as regiões oxidadas são mais extensas. A maior estabilidade da camada de óxido em geral corresponde a uma redução da severidade do desgaste, quando o contato se torna metálico a taxa de desgaste é maior (HUTCHINGS, 1992, p. 87).

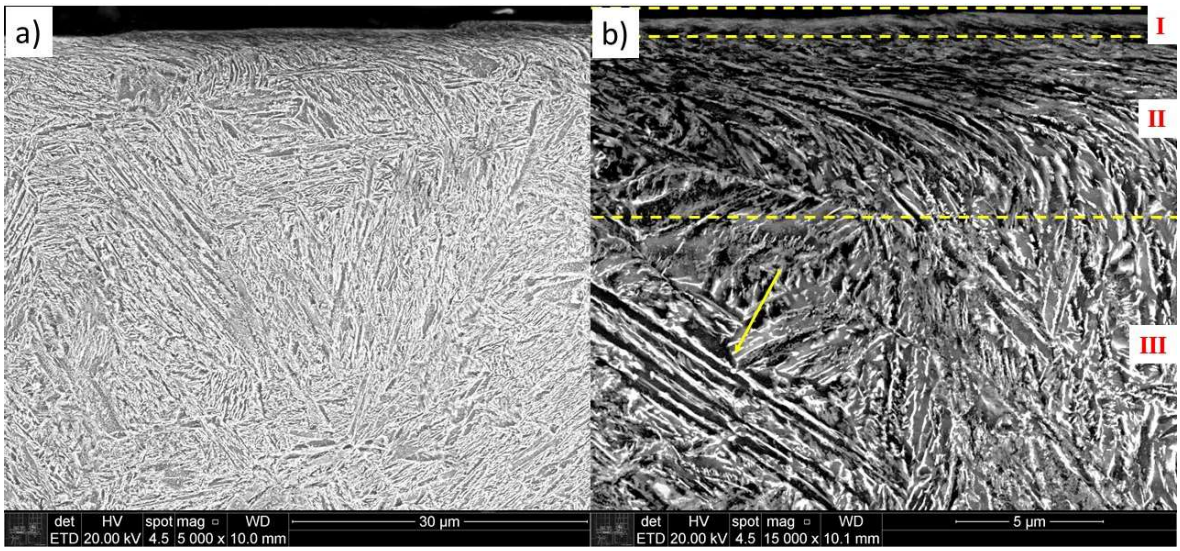
Os principais mecanismos de desgaste identificados foram adesão e formação e remoção de camada de óxido, esses mecanismos são consistentes com o que pode ser esperado para desgaste por deslizamento puro de metais sem lubrificação segundo Archard (1956), no entanto, segundo o mapa de mecanismos de desgaste de Lim e Ashby (1987) era esperado apenas desgaste oxidativo. As baixas taxas de desgaste reportadas na Tabela 4.4 e os mecanismos de desgaste visualizados (Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14) são compatíveis com um regime de desgaste moderado.

As três figuras a seguir (Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17) ilustram o aspecto da microestrutura deformada na superfície perpendicular à superfície de desgaste nos pinos de material de roda ferroviária após os ensaios pino contra disco. Todas as amostras de pino apresentaram uma deformação característica similar à observada nos ensaios pino contra disco para material modelo – aço 1080 (Figura 3.18, Figura 3.19 e

Figura 3.20), a microestrutura tendeu a se curvar paralelamente à direção de deslizamento. Um desenho esquemático dessa deformação encontrada foi mostrado na Figura 3.21. Não foram encontradas trincas superficiais nas imagens.

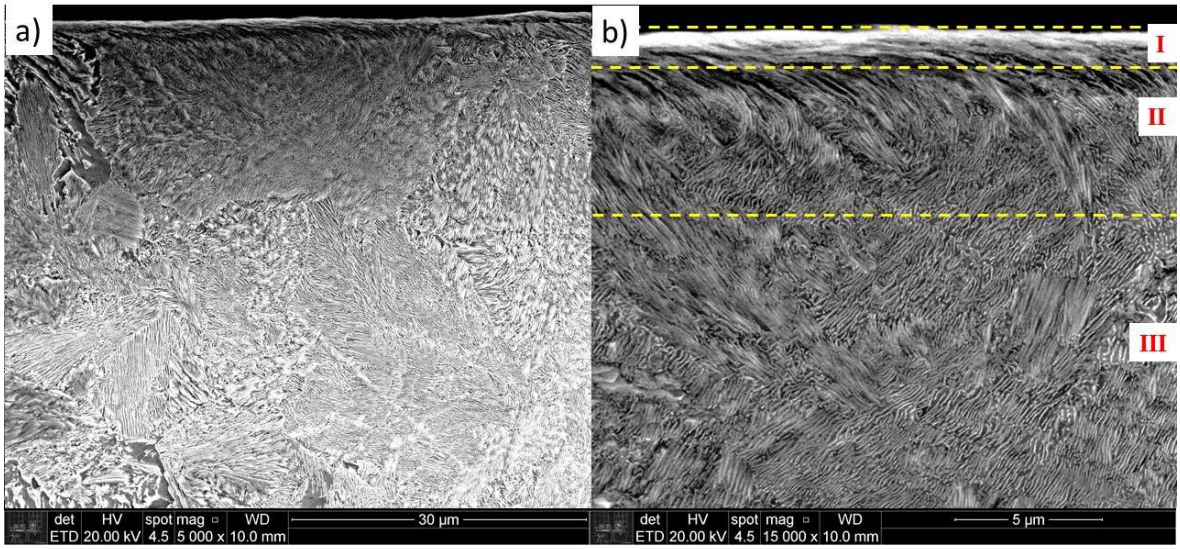
A amostra de primeira vida é apresentada na Figura 4.15, a deformação da superfície deu origem a três regiões distintas. Na Região I observa-se uma camada fina de óxido. Na Região II a camada sofreu uma acentuada deformação plástica e a microestrutura perdeu a sua morfologia em regiões próximas à superfície, a estrutura bainítica deformou-se seguindo a direção contrária ao sentido do movimento do pino. Na Região III a microestrutura não apresentou mudança significativa na estrutura mesmo que tenha sofrido aumento da dureza (vide Figura 4.18) por estar no limite da interface entre o material base e a região deformada.

Figura 4.15 - Amostra 1° vida. Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do pino de material de roda ferroviária microligada fundida proveniente do ensaio pino contra disco. a) SE - 5.000x b) SE - 15.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



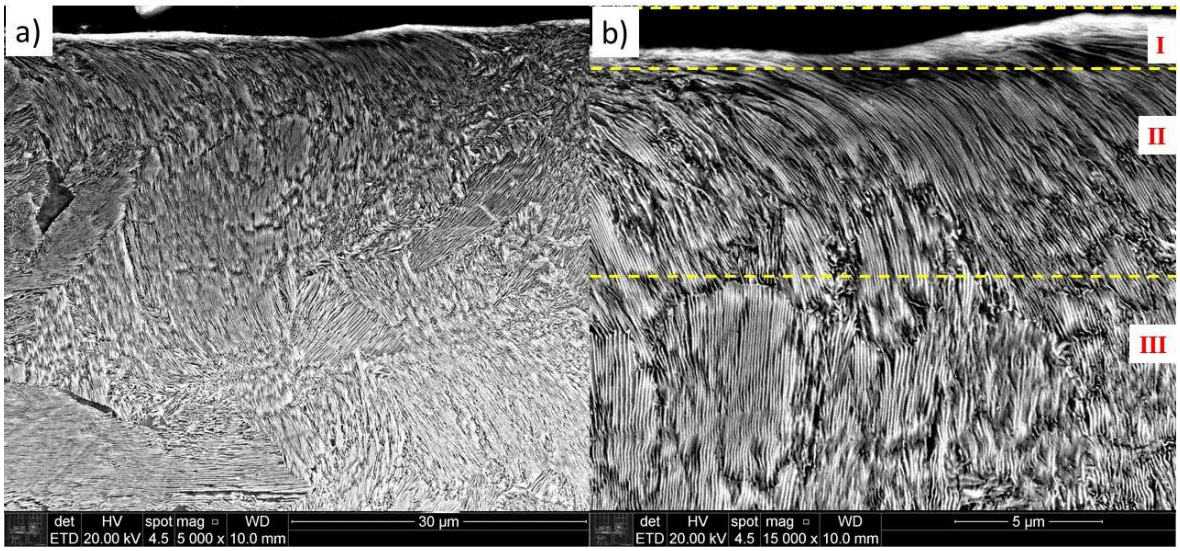
Na Figura 4.16, correspondente à amostra de segunda vida, são observadas as mesmas três regiões encontradas na amostra de primeira vida com espessuras aproximadamente iguais. Nota-se também a alteração da morfologia da perlita devido à deformação severa. Quando deformado severamente existe a possibilidade de sobressaturar a ferrita do carbono seguindo a tendência do processo de trefilação de aços com microestrutura similar o qual resulta numa região com altíssima resistência (XIN et al., 2018).

Figura 4.16 - Amostra 2° vida. Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do pino de material de roda ferroviária microligada fundida proveniente do ensaio pino contra disco. a) SE - 5.000x b) SE - 15.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A Figura 4.17 apresenta a superfície abaixo da superfície de desgaste para a amostra de terceira vida. As lamelas de perlita foram deformadas e alinhadas na direção oposta ao movimento e ocorreu a redução do espaçamento interlamelar na Região II. Apenas em uma pequena camada da Região II a perlita perdeu a sua configuração lamelar. Nota-se uma acentuada deformação plástica superficial e uma camada de óxido (Região I) mais espessa quando comparada às outras vidas.

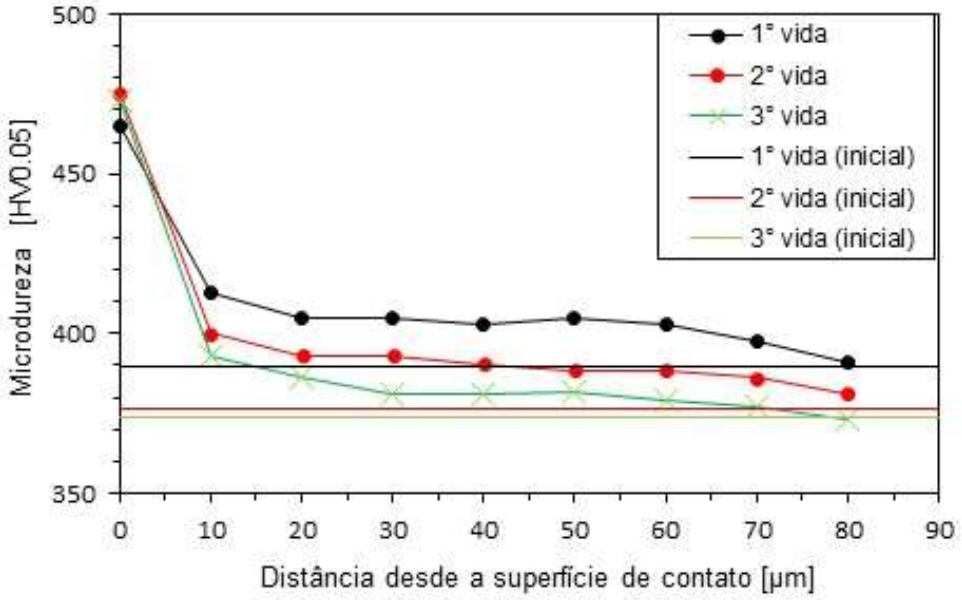
Figura 4.17 - Amostra 3° vida. Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do pino de material de roda ferroviária microligada fundida proveniente do ensaio pino contra disco. a) SE - 5.000x b) SE - 15.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A variação da microdureza dos pinos de roda ferroviária em suas múltiplas vidas em função da distância desde a superfície desgastada após os ensaios de desgaste pino contra disco é apresentada na Figura 4.18. Verifica-se que a deformação severa no contato pino contra disco aumenta a dureza na região, esse encruamento pode influenciar na resistência ao desgaste. A quantidade de deformação plástica diminui gradativamente com o aumento da distância desde a superfície de desgaste.

Contrastando os resultados desse capítulo com os do capítulo anterior, nota-se que as camadas severamente deformadas das amostras de múltiplas vidas de uma roda ferroviária microligada possuem aproximadamente 10 µm, menos espessas quando comparadas com as camadas encontradas para os ensaios de desgaste por deslizamento puro com pinos de material modelo 1080 (Figura 3.22). A camada severamente deformada nos pinos de material modelo variou de 20 µm, para microestruturas com dureza similar às encontradas nesse estudo (amostra 550C – 382 HV), até 50 µm para a amostra de perlita grosseira (amostra 700C - 224 HV). A menor espessura da camada deformada nas rodas ferroviárias quando comparada ao material modelo (aço 1080) pode ter ocorrido devido ao processo de revenido ao qual as rodas foram submetidas, esse tratamento térmico pode introduzir outros mecanismos para reduzir a mobilidade de discordâncias, como por exemplo, a precipitação de microligantes.

Figura 4.18 - Variação da microdureza dos pinos de roda ferroviária em suas múltiplas vidas em função da distância desde a superfície desgastada após os ensaios de desgaste pino contra disco.



A Tabela 4.7 apresenta os valores de microdureza encontrados nos pinos em função da distância desde a superfície de desgaste e o aumento percentual em relação à dureza inicial do material antes dos ensaios de desgaste por deslizamento puro. A amostra de terceira vida, que possuía a menor dureza, apresentou o maior encruamento na superfície atingindo 473 HV, ou seja, um aumento de 26%. Enquanto a de primeira obteve 465 HV na superfície (19% de aumento). Porém, em regiões menos deformadas, todas as amostras tiveram um aumento de dureza similar variando de 1% até 4%.

As amostras perlíticas obtiveram o maior encruamento na superfície, resultado semelhante ao encontrado nos ensaios de desgaste por deslizamento puro com o aço 1080. Conforme apresentado na Tabela 3.10 e na Figura 3.22, quanto menor a dureza da perlita maior será o aumento de dureza devido à deformação plástica (encruamento). Como as durezas das amostras de segunda e terceira vida de roda ferroviária são muito similares, o acréscimo da dureza também foi equivalente.

Tabela 4.7 – Variação da microdureza dos pinos de múltiplas vidas de uma roda ferroviária em função da distância desde a superfície de contato com o disco.

Amostra	Distância desde a superfície de contato [µm]								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
	Valores em HV [% de aumento em relação à dureza inicial]								
1° Vida	465 [19%]	413 [6%]	405 [4%]	405 [4%]	403 [3%]	405 [4%]	403 [3%]	398 [2%]	391 [0%]
2° Vida	475 [26%]	400 [6%]	393 [4%]	393 [4%]	391 [4%]	389 [2%]	389 [2%]	386 [2%]	381 [1%]
3° Vida	473 [26%]	393 [5%]	386 [3%]	381 [2%]	381 [2%]	382 [2%]	379 [1%]	377 [1%]	373 [1%]

Na Tabela 4.8 estão consolidados os principais resultados obtidos após os ensaios pino contra disco para avaliar o desgaste por deslizamento puro das múltiplas vidas de uma roda ferroviária microligada.

Tabela 4.8 - Resultados consolidados dos ensaios pino contra disco com pinos de múltiplas vidas de uma roda ferroviária microligada contra discos de aço H13.

Amostra	Coeficiente de atrito médio	Espessura da camada severamente deformada [µm]	Dureza superficial inicial [HV]	Dureza superficial final [HV]	Diferença percentual entre a dureza superficial final e inicial	Perda de massa dos pinos [mg]	Microestrutura	Espaçamento lamelar médio da perlita [nm]
1° vida	0,57	8	389	465	19%	3,38	Bainita	-
2° vida	0,72	8	376	475	26%	1,59	Bainita + Perlita	73
3° vida	0,68	10	374	473	26%	1,55	Perlita	93

No estudo sobre a resistência ao desgaste por deslizamento puro em função das múltiplas vidas de uma roda ferroviária foram analisadas três profundidades do aro desde a pista de rolamento (10 mm, 30 mm e 50 mm) correspondentes às três vidas (reperfilamentos). A primeira vida apresentou microestrutura bainítica com 389 HV, a segunda microestrutura mista de perlita e bainita com ferrita em contorno de grão com 376 HV e a terceira perlita com ferrita em contorno de grão com 374 HV.

Após os ensaios de desgaste, a espessura da camada deformada encontrada nos pinos foi aproximadamente igual em todas as vidas, no entanto, a

amostra totalmente bainítica atingiu o menor encruamento superficial (19% de aumento de dureza).

Os ensaios tribológicos apresentaram regime moderado de desgaste devido à taxa de desgaste e aos indícios de desgaste oxidativo observados nas imagens da superfície de desgaste analisada por microscopia eletrônica de varredura. Colocando os valores desses ensaios no mapa de desgaste proposto por Lim e Ashby (1987) chega-se a um resultado similar, indicando que os ensaios ocorreram no regime de desgaste moderado com mecanismo oxidativo.

A variável com diferença mais acentuada observada foi a perda de massa dos pinos após os ensaios de deslizamento puro, as amostras bainíticas apresentaram o dobro de perda de massa. Supõe-se que a estrutura bainítica possui menor resistência ao desgaste por deslizamento puro a seco quando comparada com a estrutura mista (bainita e perlita) e com a predominantemente perlítica. As amostras bainíticas apresentaram menor deformação superficial e maior dureza microestrutural, pode-se supor que a microestrutura tem mais tendência ao desgaste por corte do que por amassamento evidenciado pela deformação plástica superficial.

4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ROLAMENTO E DE FADIGA DE CONTATO POR ROLAMENTO

4.2.1 Materiais e métodos

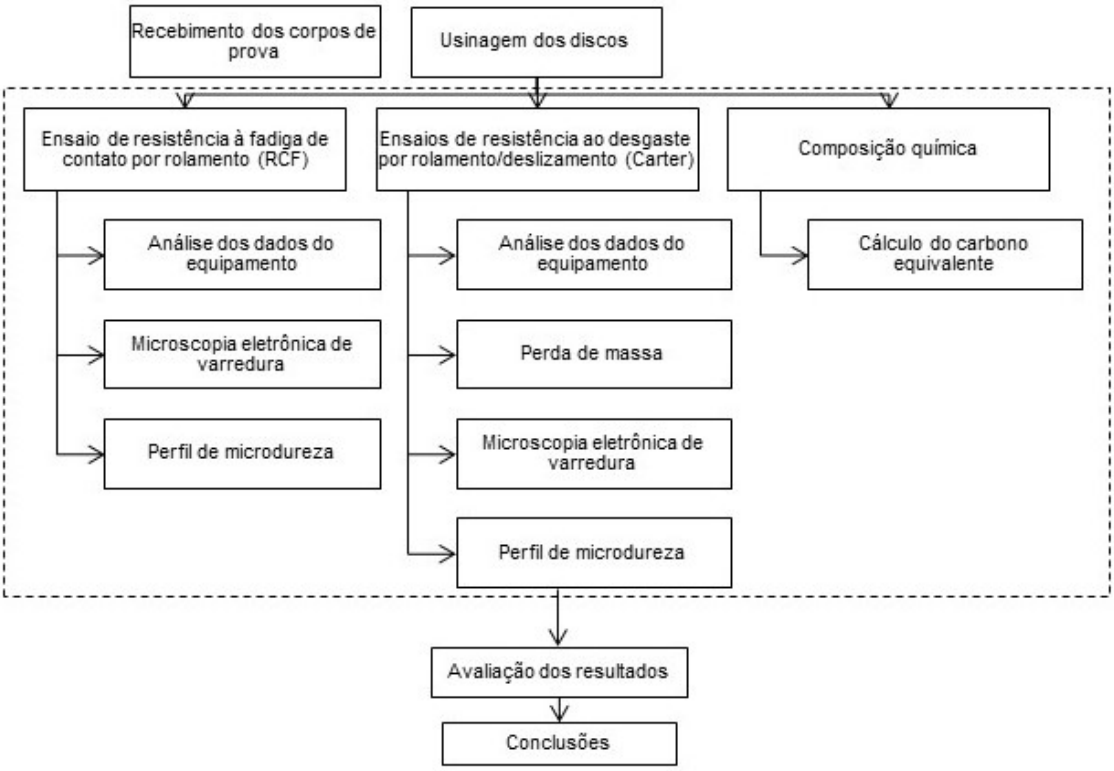
Foram realizadas duas séries de ensaios disco contra disco, uma para o estudo de resistência à fadiga das rodas segundo a norma AAR M-107/M-208 e outra com a finalidade de avaliar a resistência ao desgaste por rolamento com escorregamento variável e também obter uma curva de Carter. Carter propôs uma relação entre o coeficiente de atrito e o escorregamento para analisar as condições de deslizamento-rolamento (CARTER, 1926). Ambos os estudos foram realizados com contato seco (sem adição de modificadores de atrito) e são detalhados a seguir:

1) ensaios de desgaste por rolamento com escorregamento variável sem lubrificação. Discos de material de uma roda ferroviária fundida microligada contra discos de trilho ferroviário premium, escorregamentos de 0,5% até 5%, ensaios encerrados após 8.000 ciclos;
2) ensaios de fadiga de contato por rolamento (RCF – *rolling contact fatigue*) sem lubrificação. Ambos os discos de material de roda ferroviária fundida microligada, escorregamento de 0,3%, ensaios encerrados após o início de *shelling*.

Os ensaios foram realizados num simulador de contato roda-trilho (tribômetro disco contra disco) pertencente à Universidade Nacional da Colômbia no campus Medellín.

O fluxograma das principais etapas e ensaios é apresentado na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Fluxograma das etapas e ensaios para estudo comparativo da resistência ao desgaste por rolamento com escorregamento variável e à fadiga de contato por rolamento (RCF) nas múltiplas vidas de uma roda ferroviária.

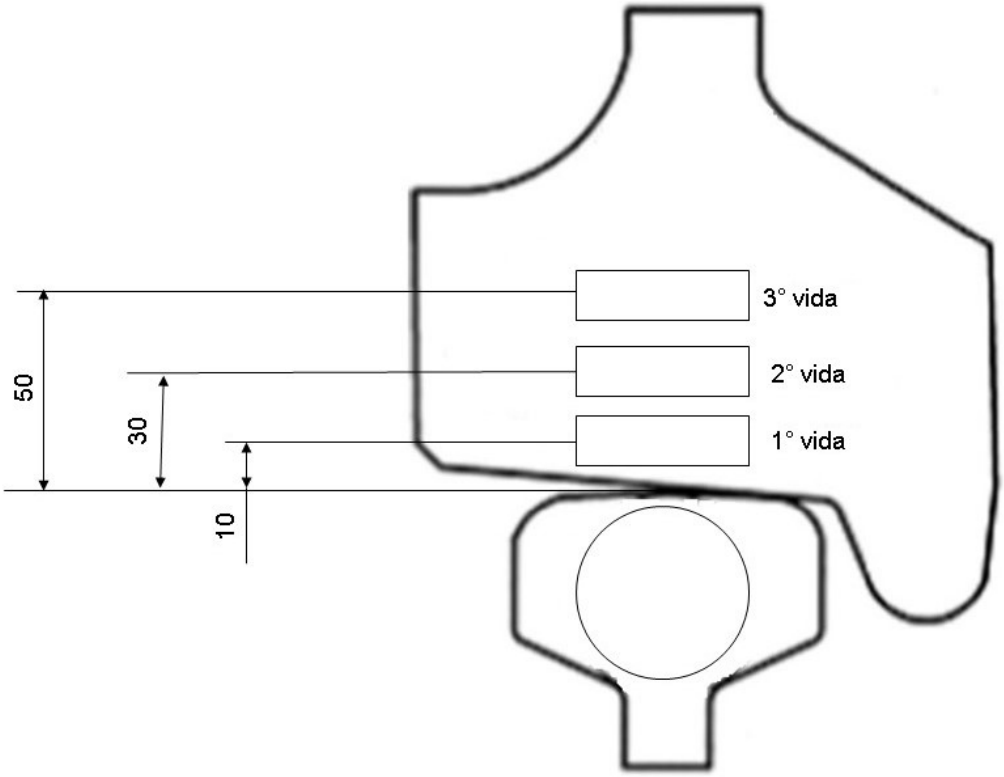


4.2.1.1 Amostras

Os corpos de prova (discos) foram retirados de rodas e trilhos ferroviários. As amostras de roda utilizadas nesses ensaios foram retiradas da mesma roda que foi utilizada para o ensaio pino contra disco apresentado na seção 4.1 (roda nova fundida classe D AAR). Os discos foram usinados a partir de três regiões desde a pista de rolamento correspondentes a cada vida da roda. Os discos de trilho foram usinados a partir de um trilho ferroviário classe DHH 370HB premium. Na Figura 4.20 são apresentadas as regiões de extração das amostras para os ensaios tribológicos.

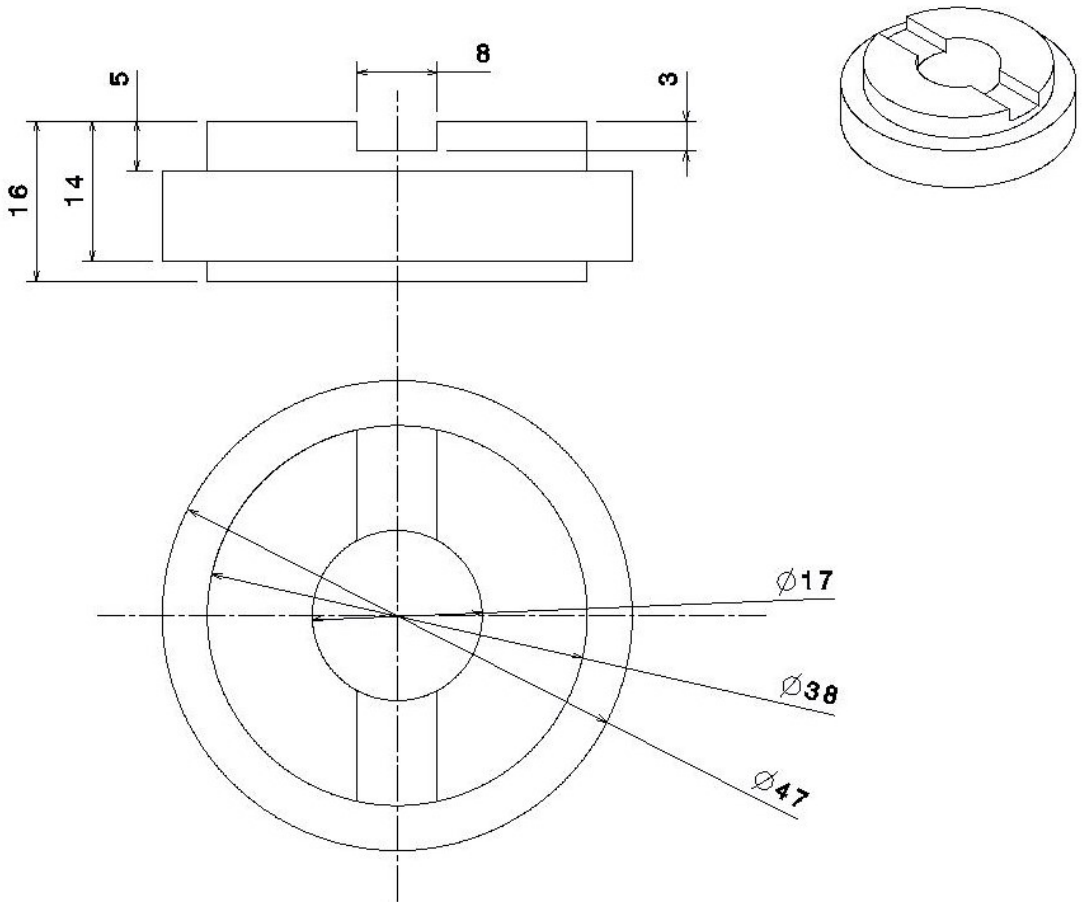
Foi possível utilizar o disco do trilho a partir de amostras usinadas conforme a Figura 4.20 uma vez que todos os mapas de dureza realizados na região do boleto do trilho apresentaram variação das médias menor de 11 HB, assim observa-se uma homogeneidade de dureza na região do boleto (TRESSIA, 2018).

Figura 4.20 - Desenho esquemático da região de retirada dos discos das múltiplas vidas de uma roda ferroviária microligada e de um trilho para realização de ensaios disco contra disco. Dimensões em mm.



Na Figura 4.21 é apresentado o desenho esquemático com as dimensões dos discos utilizados como corpos de prova após a usinagem, todos os discos (rodas e trilhos) possuíam as mesmas dimensões, 47 mm de diâmetro externo e 9 mm de espessura de pista de rolamento (BEYNON; GARNHAM; SAWLEY, 1996).

Figura 4.21 – Desenho esquemático com as dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios disco contra disco. Dimensões em mm.



Para caracterização das amostras de roda e trilho utilizadas nessa etapa do estudo, foram executadas análises da composição química por espectrometria de emissão ótica, cálculo do carbono equivalente, medição da dureza da estrutura e caracterização microestrutural utilizando de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura. Esses procedimentos são idênticos aos descritos nas seções 3.1.2 e 3.1.3.

4.2.1.2 Ensaios tribológicos

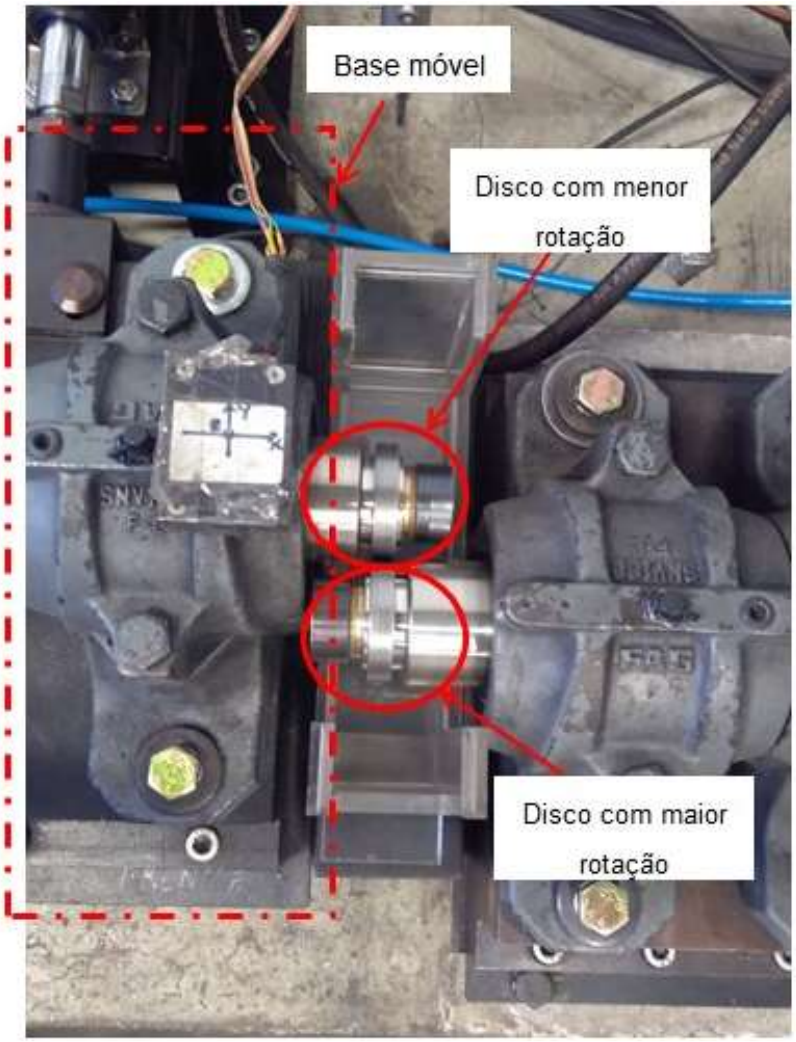
Os ensaios tribológicos foram realizados em um tribômetro disco contra disco (Figura 4.22) com controle de rotação independente em cada eixo. O equipamento pertence ao Grupo de Tribologia e Superfícies (GTS) da Universidade Nacional da Colômbia campus Medellín. Detalhes construtivos desse equipamento foram detalhados no trabalho realizado por Maya-Johnson (MAYA JOHNSON,

2014). Esse equipamento foi desenvolvido para simular o tribossistema roda-trilho com condições similares às observadas em operação.

Figura 4.22 - Tribômetro disco contra disco com controle de rotação independente em cada eixo pertencente ao GTS – Grupo de Tribologia y Superficies da Universidade Nacional de Colômbia – Campus Medellín.

Os corpos de prova para os ensaios disco contra disco eram montados no tribômetro conforme Figura 4.23. O disco com maior rotação é montado no eixo acoplado ao motor de maior potência (15 HP) por sua vez fixado numa base fixa, enquanto o disco com menor rotação é montado no eixo acoplado ao motor de menor potência (10 HP) fixado numa base móvel. A carga é aplicada na direção perpendicular às linhas de centro dos eixos por meio de um atuador pneumático que promove o deslocamento da base móvel. No eixo da base fixa é acoplado um medidor de torque e tangencialmente ao eixo da base móvel é fixado uma célula de carga (MAYA JOHNSON, 2014).

Figura 4.23 – Esquema da montagem dos discos no tribômetro disco contra disco pertencente ao GTS – Grupo de Tribologia y Superficies da Universidade Nacional de Colômbia – Campus Medellín.



Para calcular as rotações dos discos é utilizada a Equação 8. **R_R** e **R_T** são os raios dos discos em milímetros e **N_R** e **N_T** são as velocidades de rotação dos discos em rpm, nesse caso as velocidades das amostras de roda e trilho respectivamente. O escorregamento calculado é um valor percentual e negativo. Nos ensaios de RCF os dois discos são de material de roda, então o disco que possui a menor velocidade de rotação é considerado nesse cálculo como sendo o trilho (MAYA-JOHNSON; FELIPE SANTA; TORO, 2017).

$$D(\%) = \frac{200(R_T N_T - R_R N_R)}{R_T N_T + R_R N_R} \quad (8)$$

Como os corpos de prova são dois cilindros a região de contato teórica seria apenas uma linha de comprimento **L**. Sabe-se, no entanto, que de acordo com o modelo previsto por Hertz (*Hertzian contact*), devido à carga aplicada **F** ocorre uma deformação elástica na região e a área de contato passa a ser um retângulo de comprimento de contato **L** e semi-largura de contato **a**.

Para atingir a pressão de contato definida em 1,1 GPa (pressão máxima ou pressão de Hertz) é necessária a realização de cálculos para estimar qual carga deverá ser aplicada sobre os corpos de prova. Essa pressão de contato corresponde à imposta na região de contato roda-trilho em transportes *heavy haul* (MAYA-JOHNSON; FELIPE SANTA; TORO, 2017).

A semi-largura de contato **a** é calculada a partir da Equação 9, sendo $\mathbf{R_x}$ o raio equivalente e **E*** o módulo de Young equivalente. **Rx** e **E*** são calculados pelas Equações 10 e 11 respectivamente. O valor de **a** calculado é em função de **F**.

$$a = \sqrt{\frac{2}{\pi}\frac{R_x}{E^*}\frac{F}{L}} \tag{9}$$

$\mathbf{R_1}$ e $\mathbf{R_2}$ são os raios dos discos em metros.

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{10}$$

$\mathbf{E_1}$ e $\mathbf{v_1}$ são o módulo de Young e o coeficiente de Poisson para o material do disco 1 e $\mathbf{E_2}$ e $\mathbf{v_2}$ para o material do disco 2.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \tag{11}$$

Assim, substituindo o valor da semi-largura de contato **a** em função de **F** na Equação 12, obtém-se o valor da força **F** em Newton que deve ser aplicada para atingir a pressão máxima de Hertz $\mathbf{P_0}$. Para cada ensaio esse valor foi recalculado pois os raios dos discos têm uma pequena variação devido à usinagem da superfície de rolamento.

$$P_0 = \frac{2F}{\pi a L} = 1{,}1\ GPa \qquad (12)$$

4.2.1.2.1 Ensaios de desgaste por rolamento

Os ensaios de resistência ao desgaste por rolamento foram realizados sem lubrificação, com pressão de contato de 1,1 GPa e considerando cinco percentuais de escorregamento (0,5%, 1%, 2%, 3% e 5%). Maya-Johnson e colegas (2017) estimaram que a pressão de contato de 1,1 GPa representa as cargas impostas na região de contato roda-trilho para implementações pesadas (*heavy haul*).

Os corpos de prova foram ensaiados até se obter um coeficiente de atrito estável para cada valor de escorregamento (*creepage*). O período para atingir essa condição foi de aproximadamente 8.000 ciclos. Para o disco de maior rotação foram utilizados corpos de prova provenientes de cada vida de uma roda ferroviária microligada e para os discos com menor rotação corpos de prova de trilho classe DHH 370HB Premium.

Na Tabela 4.9 são detalhados os parâmetros que foram utilizados nos ensaios de desgaste de configuração disco contra disco para obtenção da curva de Carter e da avaliação à resistência ao desgaste por rolamento.

Tabela 4.9 – Parâmetros utilizados nos ensaios de desgaste por rolamento com diferentes escorregamentos.

Parâmetro	**Descrição**
Lubrificação entre as amostras	Ausente
Carga aplicada	3.600 N
Modo de aplicação da carga	Atuador pneumático
Escorregamentos (*creepages*)	0,5%, 1%, 2%, 3% e 5%
Velocidade de rotação do disco mais rápido	400 rpm
Duração do ensaio	8.000 ciclos
Pressão máxima de contato	1,1 GPa
Quantidade de réplicas para cada condição	2
Material do disco mais rápido	Trilho DHH 370HB
Material do disco mais lento	Roda ferroviária fundida microligada (3 vidas)

No início de cada ensaio, era realizada uma pré carga entre as amostras e verificado se a área de contato entre os discos estava correta de acordo com a

carga aplicada (MAYA-JOHNSON; FELIPE SANTA; TORO, 2017). No início e no final de cada ensaio, as amostras eram lavadas com água e sabão, submergidas em uma cuba com álcool colocada no ultrassom, secadas e em seguida a massa perdida era mensurada por meio de uma balança de precisão. Duas réplicas para cada vida foram ensaiadas para avaliar a repetibilidade dos resultados. Esse procedimento também foi utilizado nos ensaios de RCF descritos a seguir.

Com essas análises espera-se obter as curvas de Carter para cada uma das múltiplas vidas de uma roda ferroviária e compreender o comportamento quanto à resistência ao desgaste por rolamento com diferentes valores de escorregamento.

4.2.1.2.2 Ensaios de resistência a RCF (fadiga de contato por rolamento)

Os ensaios de resistência a RCF (fadiga de contato por rolamento) foram realizados com pressão de contato de 1,1 GPa e 0,3% de escorregamento entre os discos, sem lubrificação, seguindo os procedimentos descritos na norma para rodas ferroviárias AAR (AAR M-107/M-208, 2011). O final do ensaio é determinado pela detecção de um sinal emitido pelo acelerômetro (sensor de vibração) que pode ser relacionado ao início do dano gerado por *shelling*. Os pares de discos utilizados são de material de roda ferroviária correspondente a cada uma das três vidas. Pretende-se após esses ensaios indicar qual vida apresenta a melhor resistência à fadiga de contato por rolamento.

Na Tabela 4.10 são descritos os parâmetros que foram utilizados nos ensaios de desgaste na configuração disco contra disco para estudo da fadiga de contato por rolamento.

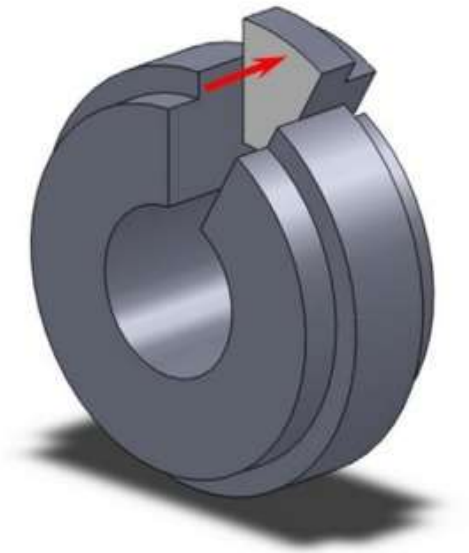
Tabela 4.10 – Parâmetros utilizados nos ensaios de resistência à fadiga de contato por rolamento do tipo disco contra disco.

Parâmetro	**Descrição**
Lubrificação entre as amostras	Ausente
Carga aplicada	3.600 N
Modo de aplicação da carga	Atuador pneumático
Escorregamentos (*creepage*)	0,3%
Velocidade de rotação do disco mais rápido	400 rpm
Duração do ensaio	Até o início de *shelling*
Pressão máxima de contato	1,1 GPa
Quantidade de réplicas para cada condição	2
Material do disco mais rápido	Roda ferroviária fundida microligada (3 vidas)
Material do disco mais lento	Roda ferroviária fundida microligada (3 vidas)

4.2.1.2.3 Caracterização das amostras após os ensaios disco-disco

Para observar a região da subsuperfície, as amostras provenientes dos ensaios tribológicos disco contra disco foram cortadas de acordo com o esquema da Figura 4.24. Em seguida, as amostras foram preparadas metalograficamente (embutidas em matriz de resina fenólica, lixadas, polidas e atacas por uma solução de Nital) e examinadas por meio de microscopia eletrônica de varredura conforme descrito na seção 3.1.4.1.

Figura 4.24 – Esquema dos cortes necessários para extração de amostras para análise da sub-superfície.



Fonte: Adaptado de Maya-Johnson, Santa e Toro (2017).

Para o estudo da região deformada também foram estimados os valores de comprimento, profundidade e ângulo de abertura de trincas. Para cada vida foram analisadas as trincas presentes nas imagens da seção perpendicular à superfície obtidas por microscopia eletrônica de varredura por meio do programa de análise de imagens ImageJ.

4.2.2 Resultados e discussões

4.2.2.1 Composição química e carbono equivalente

Na Tabela 4.11 são apresentadas as composições químicas das amostras de roda e trilho ferroviários utilizados nos ensaios disco contra disco. O material de roda é o mesmo utilizado nos ensaios de deslizamento puro (pino contra disco) da seção 4.1 desse trabalho. O teor de carbono equivalente calculado para as amostras foi igual a 0,9315%p para a roda e 1,0380%p para o trilho, ambas as amostras são aços hipereutetoides.

Tabela 4.11 - Composição química das amostras utilizadas nos ensaios disco contra disco: múltiplas vidas de uma roda ferroviária.

Concentração química [%p]			
Roda		**Trilho**	
Carbono = 0,7400	Manganês = 0,7200	Carbono = 0,8200	Manganês = 1,0360
Silício = 0,7000	Fósforo = 0,0170	Silício = 0,2430	Fósforo = 0,0153
Enxofre = 0,0130	Cobre = 0,0240	Enxofre = 0,0077	Cobre = 0,0120
Cromo = 0,2610	Níquel = 0,0200	Cromo = 0,2130	Níquel = 0,0120
Estanho = 0,0020	Nióbio = 0,0010	Estanho = 0,0011	Nióbio = 0,0003
Molibdênio = 0,0770	Chumbo = 0,0001	Molibdênio = 0,0040	Chumbo = 0,0010
Alumínio = 0,0095	Vanádio = 0,0050	Alumínio = 0,0020	Vanádio = 0,0016
Titânio = 0,0020	Boro = 0,0001	Titânio = 0,0008	Boro = 0,0002

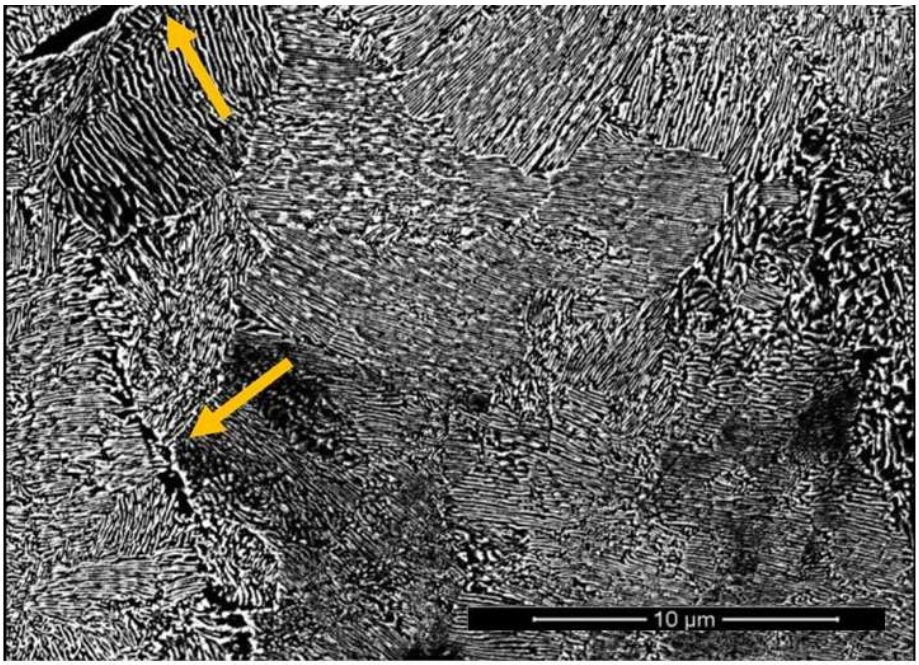
4.2.2.2 Caracterização microestrutural

A caracterização da roda ferroviária microligada fundida em suas múltiplas vidas é igual à descrita anteriormente na Seção 4.1.2.2.

O trilho DHH 370HB premium utilizado nessa série de ensaios apresentou dureza de 371,8 ± 8,8 HV, valor esse dentro dos limites esperados para essa classificação de trilho ferroviário segundo a norma da *American Railway*

Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA) (AREMA, 2010). A Figura 4.25 apresenta a microestrutura encontrada no trilho DHH370HB premium. Observa-se uma microestrutura típica formada por uma matriz de perlita fina com a presença de ferrita proeutetoide em contorno de grão em uma fração volumétrica mínima (indicada pelas setas amarelas na Figura 4.25).

Figura 4.25 – Aspecto da microestrutura do trilho ferroviário Premium DHH370HB. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



Fonte: adaptado de Bauri (2020)

4.2.2.3 Desgaste por rolamento

Na Figura 4.26 é apresentada a média da variação de massa para as amostras de roda ferroviária e na Figura 4.27 para as amostras de trilho em função do percentual de escorregamento. Antes e depois de cada ensaio de desgaste por rolamento com escorregamento variável a massa dos corpos de prova foi medida para avaliar a perda de massa. Para rodas e trilhos, as maiores perdas de massa foram encontradas nos ensaios com maiores percentuais de escorregamento.

Os valores de perda de massa encontrados estão na mesma ordem de grandeza dos valores observados por outros autores em condições similares de ensaios, carga, escorregamento, materiais e o mesmo equipamento de ensaios tribológicos de configuração disco contra disco (MAYA-JOHNSON; FELIPE

SANTA; TORO, 2017; MAYA JOHNSON, 2014; ZAPATA; JARAMILLO; TORO, 2011).

Figura 4.26 - Perda de massa das rodas em função da porcentagem de escorregamento (0,5%, 1%, 2%, 3% e 5%) para as três vidas de uma roda ferroviária microligada.

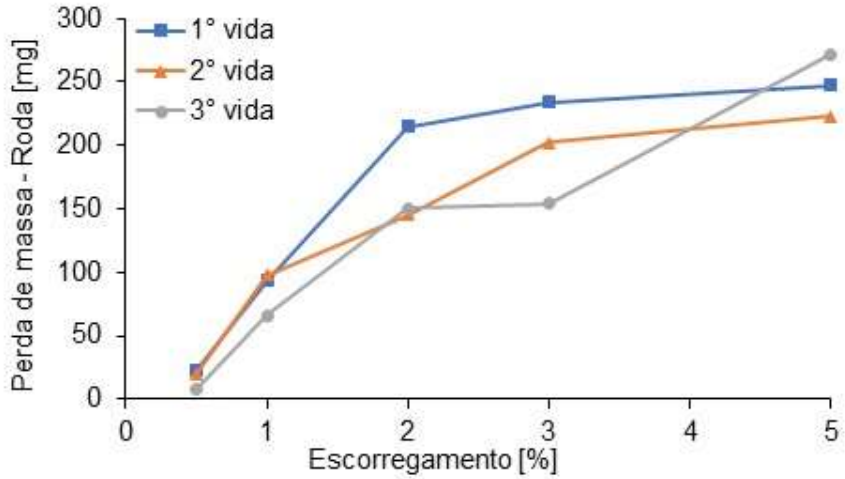
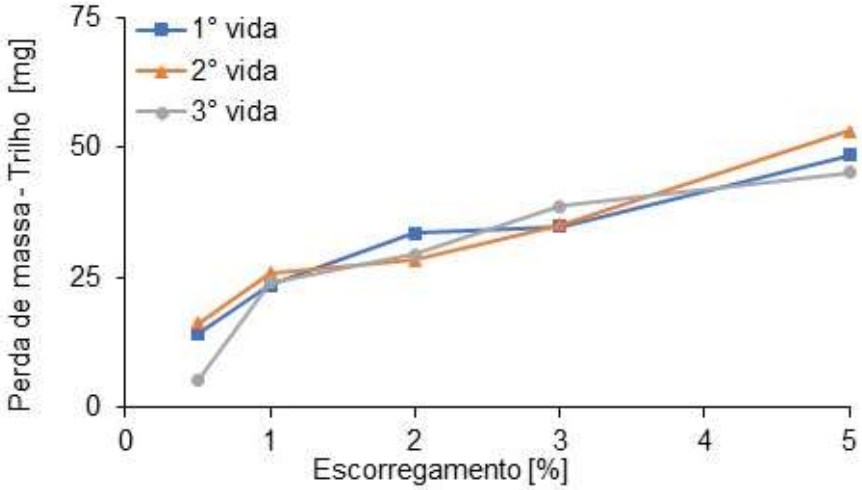


Figura 4.27 - Perda de massa dos trilhos em função da porcentagem de escorregamento (0,5%, 1%, 2%, 3% e 5%) para as três vidas de uma roda ferroviária microligada.

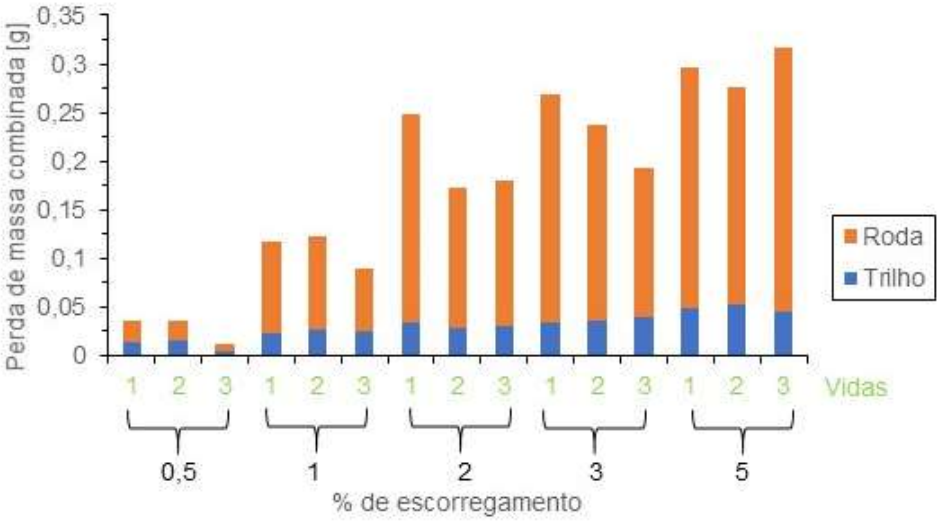


A Figura 4.28 apresenta a perda de massa combinada (roda e trilho) para cada uma das condições de escorregamento. Na condição próxima ao rolamento puro (0,5% de escorregamento) as perdas de massa da roda e do trilho são muito próximas, já em escorregamentos maiores nota-se uma maior diferença, na condição de 5% de escorregamento as rodas apresentaram uma perda de massa

cinco vezes maior que os trilhos. Para uma mesma vida, quanto maior o escorregamento, mais elevada será a perda de massa.

Percebe-se também que a amostra bainítica (primeira vida) perde mais massa em quase todas porcentagens de escorregamento, exceto para o escorregamento máximo utilizado (5% de escorregamento). Nessa condição a amostra que apresentou o pior desempenho foi a terceira vida (microestrutura homogênea de perlita).

Figura 4.28 - Perda de massa combinada (roda e trilho) para cada vida em função da porcentagem de escorregamento (0,5%, 1%, 2%, 3% e 5%).



As três figuras a seguir (Figura 4.29, Figura 4.30 e Figura 4.31) mostram a variação do coeficiente de atrito (COF) em função do número de ciclos de cada ensaio. A Figura 4.29 corresponde às réplicas para a primeira vida, a Figura 4.30 para a segunda vida e a Figura 4.31 para a terceira vida. Nota-se que o coeficiente de atrito aumenta com a elevação do escorregamento (*creepage*). Para escorregamentos superiores a 1% visualiza-se a estabilização do coeficiente de atrito em aproximadamente 1.000 ciclos. É observado também que quanto maior o escorregamento, mais rápida é a estabilização do coeficiente de atrito, ou seja, menor é o período de *running-in*.

Para os maiores escorregamentos (3% e 5%) o comportamento da curva de atrito é muito similar ao observado nos ensaios de desgaste por deslizamento puro sem lubrificação (configuração pino contra disco) (Figura 4.10). Nessas condições o coeficiente de atrito parte de um valor próximo de zero no início dos ensaios e se

eleva até um valor máximo (**$\mu_{máx}$**), em seguida o coeficiente de atrito se reduz até um patamar médio (**μ_{ss}** – regime permanente) e segue assim ao decorrer do ensaio. É possível relacionar esse comportamento com o proposto por Blau (1981) apresentado na Figura 2.14 para desgaste por deslizamento puro de metais sem lubrificação.

Figura 4.29 – Coeficiente de atrito em função do número de ciclos para os cinco escorregamentos (*creep*). 1° vida da roda ferroviária. a) primeiras réplicas b) segundas réplicas.

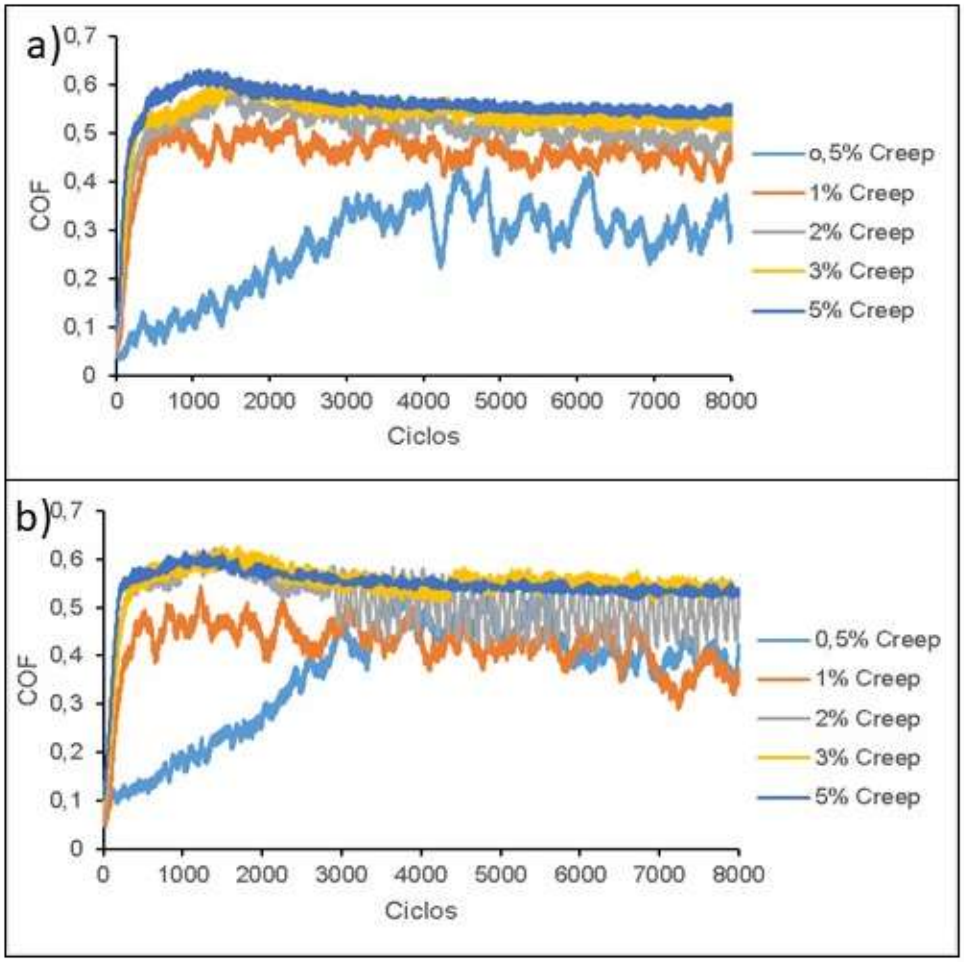


Figura 4.30 - Coeficiente de atrito em função do número de ciclos para os cinco escorregamentos (*creep*). 2° vida da roda ferroviária. a) primeiras réplicas b) segundas réplicas.

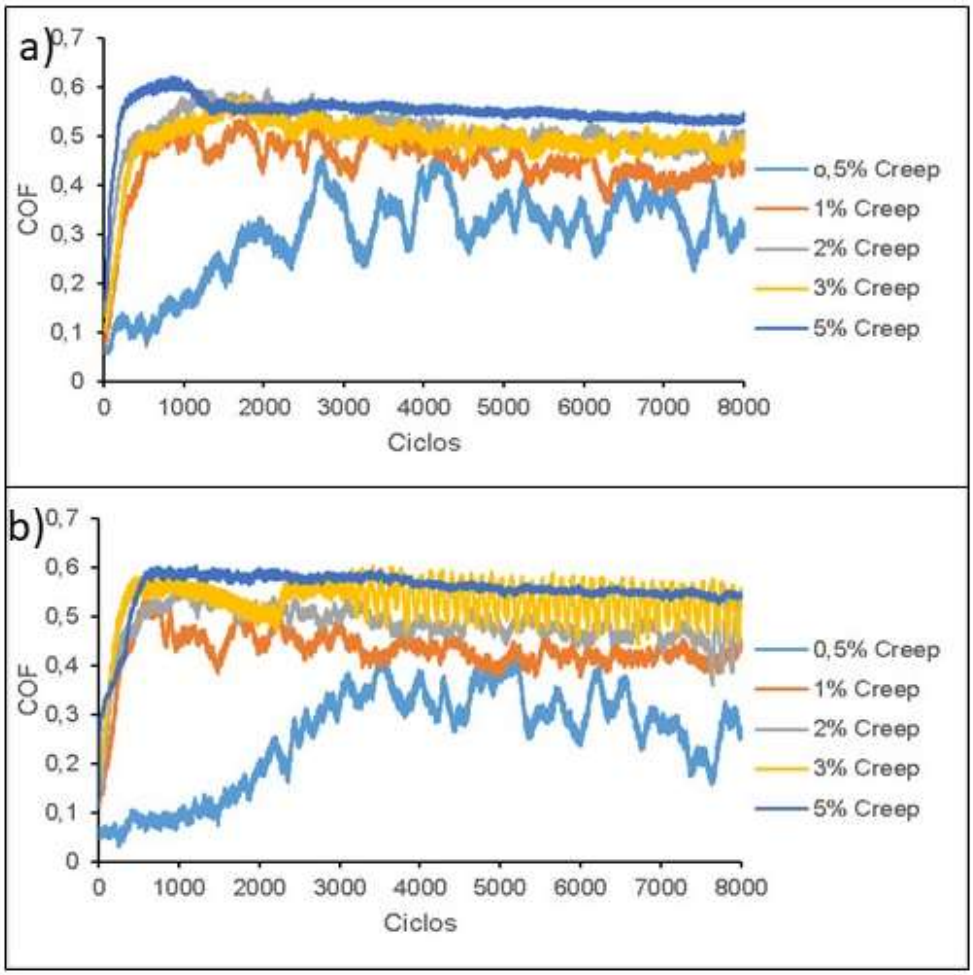
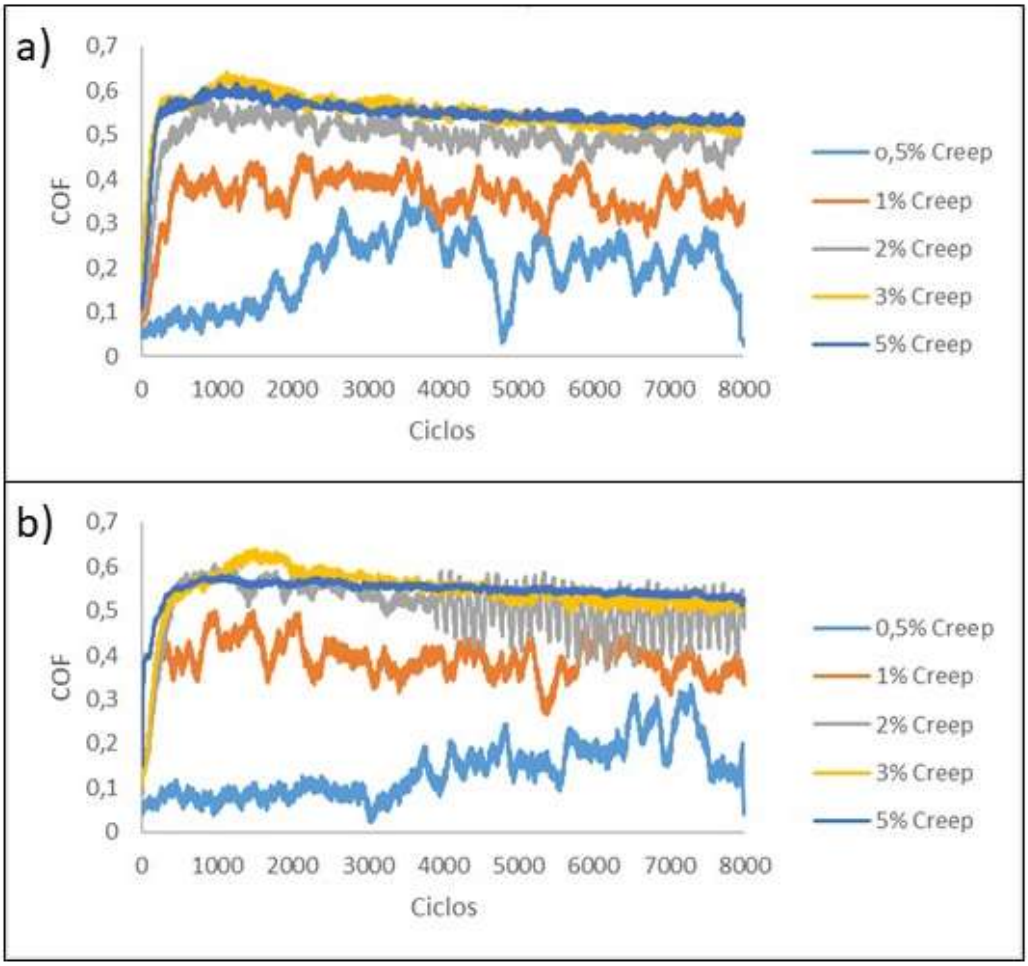


Figura 4.31 - Coeficiente de atrito em função do número de ciclos para os cinco escorregamentos (*creep*). 3° vida da roda ferroviária. a) primeiras réplicas b) segundas réplicas.



Em todas as vidas constata-se que para escorregamentos baixos (0,5%) o coeficiente de atrito é próximo ou inferior à 0,3 e que para escorregamentos altos (3% e 5%) os coeficientes de atrito permanecem entre 0,5 e 0,6. Esse aumento do coeficiente de atrito para maiores escorregamentos foi primeiramente proposto por Carter (1926) e também verificado por Makino (2012) em ensaios tribológicos disco contra disco (porém com lubrificação com água).

Na Tabela 4.12 são ordenados os valores de coeficiente de atrito para cada porcentagem de escorregamento e para todos os ensaios de desgaste por rolamento. Os valores de coeficiente de atrito médio para altos valores de escorregamentos (3% e 5%) apresentaram valores menores do que os observados para os ensaios de deslizamento puro com amostras iguais, porém com variáveis de ensaios distintas, como por exemplo pressão de contato e condições cinemáticas. Nos ensaios de desgaste por deslizamento puro (configuração pino

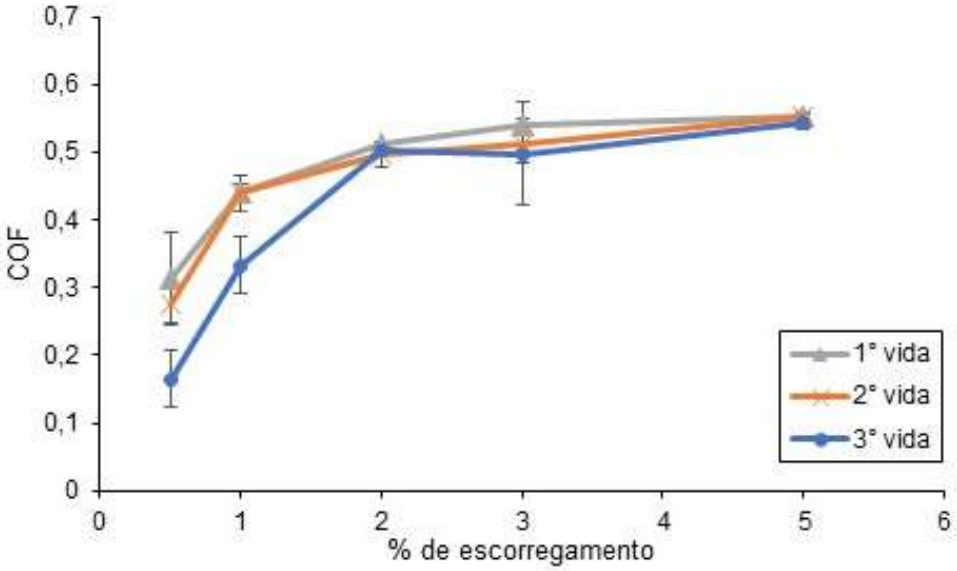
contra disco) a pressão de contato era menor (0,8 MPa) e a velocidade de deslizamento maior (0,5 m/s) comparando com os ensaios de desgaste por rolamento. Os valores de coeficiente de atrito para os ensaios de deslizamento puro foram de 0,57 (1° vida), 0,72 (2° vida) e 0,68 (3° vida) conforme apresentado na Tabela 4.6 e repetido na Tabela 4.12. Segundo Seo (2016), quanto maior o escorregamento em um ensaio disco contra disco, maior será o coeficiente de atrito e mais severo o desgaste.

Tabela 4.12 – Coeficiente de atrito para as múltiplas vidas de uma roda ferroviária em função da % de escorregamento para os ensaios do tipo disco contra disco e pino contra disco.

% de escorregamento	**Configuração de ensaio**	**Pressão de contato**	**Coeficiente de atrito para as múltiplas vidas**		
			1° vida	**2° vida**	**3° vida**
0,5%	Disco-disco	1,1 GPa	0,31 ± 0,11	0,28 ± 0,10	0,17 ± 0,07
1%	Disco-disco	1,1 GPa	0,44 ± 0,06	0,44 ± 0,06	0,33 ± 0,11
2%	Disco-disco	1,1 GPa	0,51 ± 0,06	0,50 ± 0,05	0,50 ± 0,07
3%	Disco-disco	1,1 GPa	0,54 ± 0,06	0,51 ± 0,05	0,50 ± 0,13
5%	Disco-disco	1,1 GPa	0,55 ± 0,05	0,55 ± 0,05	0,54 ± 0,06
-	Pino-disco	0,8 MPa	0,57 ± 0,07	0,72 ± 0,13	0,68 ± 0,01

A curva de Carter apresentada na Figura 4.32 relaciona o coeficiente de atrito médio com o valor de escorregamento para as múltiplas vidas de uma roda ferroviária. Verifica-se que a terceira vida (amostra perlítica) apresenta uma tendência a menores coeficientes de atrito, principalmente para menores valores de escorregamento. Por exemplo, para 0,5% de escorregamento, os ensaios com amostras de terceira vida apresentaram coeficiente de atrito médio de 0,17.

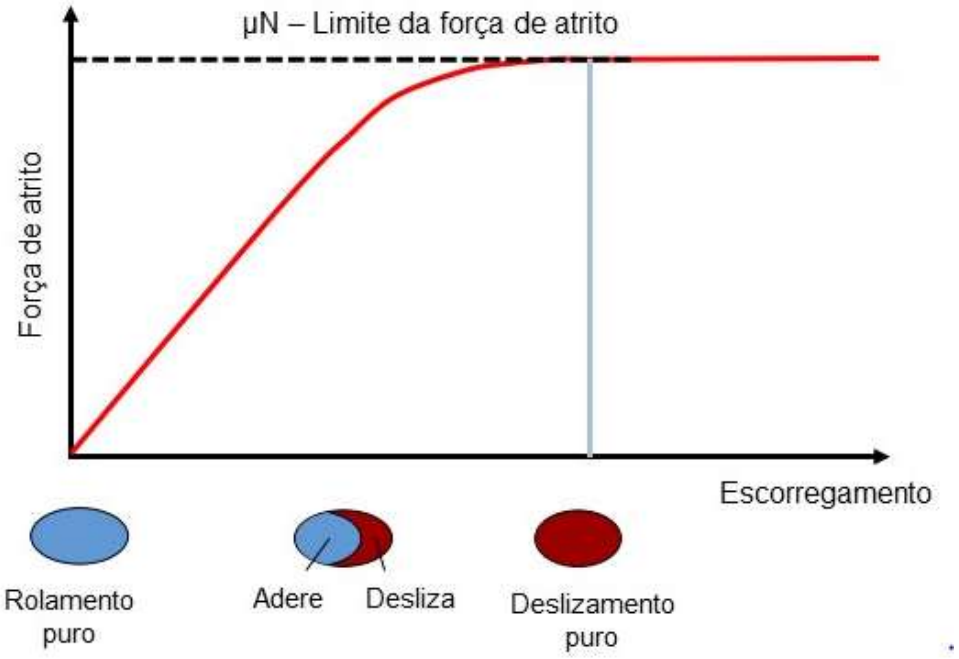
Figura 4.32 - Curva de Carter: variação do coeficiente de atrito médio em função da % de escorregamento para as três vidas de uma roda ferroviária microligada em ensaios disco contra disco.



O coeficiente de atrito tende a se estabilizar a partir de 3% de escorregamento para todas as vidas atingindo um valor de aproximadamente 0,55. Esses valores estão coerentes com os obtidos por Stock (2016) para contato roda-trilho sem lubrificação, ele estudou a influência de modificadores de atrito e lubrificantes no contato roda-trilho para gerenciamento de atrito.

Carter (1926) estudou a relação entre as forças de atrito e o escorregamento, a relação teórica define que existe uma força de atrito máxima para o rolamento-escorregamento a depender da carga aplicada como apresentado na Figura 4.33. A região de contato com deslizamento aumenta com o acréscimo do escorregamento até atingir uma condição teórica de deslizamento puro (STOCK et al., 2016).

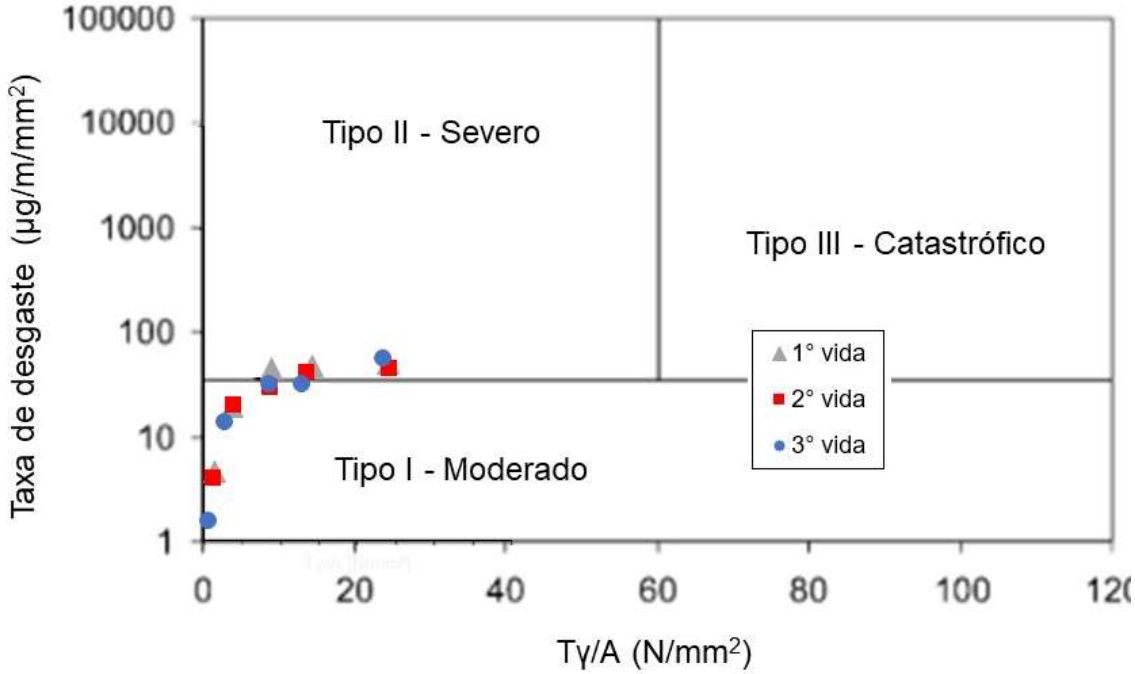
Figura 4.33 – Relação teórica entre escorregamento e força de atrito.



Fonte: Adaptado de Stock (2016).

Para avaliar o regime de desgaste predominante para esses ensaios tribológicos, foram encontrados valores que correspondem à taxa de desgaste em função de **Tγ/A** (parâmetro T-gamma dividido pela área nominal de contato) conforme descrito por Lewis e Olofsson (2004) e mostrado na Figura 2.19. Esses valores são apresentados na Figura 4.34 para as três vidas de uma roda ferroviária fundida microligada e sugerem que os ensaios com escorregamento de até 3% estão inseridos no regime de desgaste moderado (Tipo I) e os ensaios com escorregamentos de 5% estão no início do regime severo de desgaste (Tipo II).

Figura 4.34 – Parâmetro T-gamma em função da taxa de desgaste para avalização do regime de desgaste para ensaios tribológicos disco contra disco com escorregamento variável.

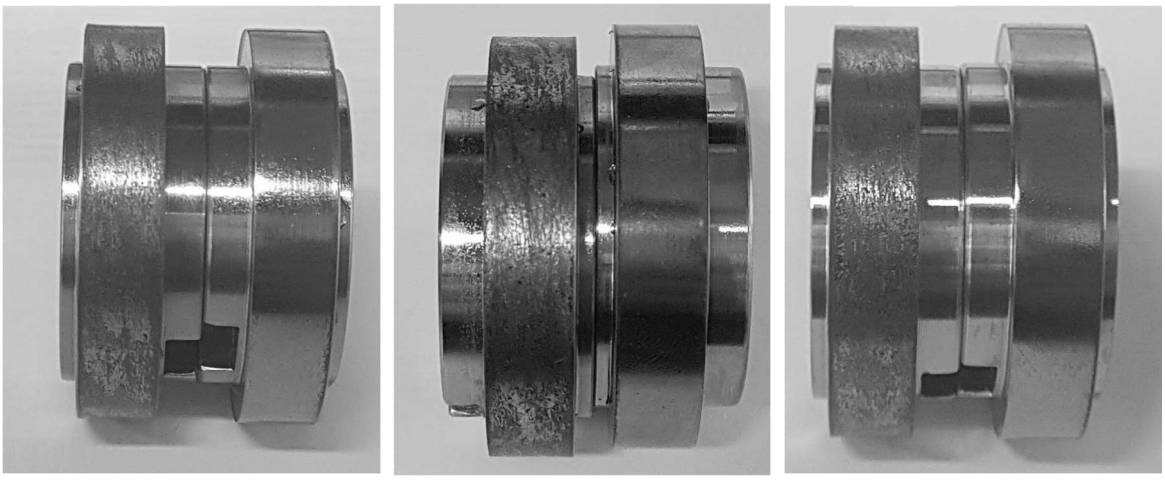


Fonte: Autora e adaptado de Lewis e Olofsson (2004).

As três imagens da Figura 4.35 apresentam o aspecto da superfície dos discos de roda e trilho após os ensaios de desgaste por rolamento com escorregamento de 5%. As superfícies dos discos com maior rotação (rodas) mostraram maior degradação superficial quando comparadas às superfícies dos discos com menor rotação (trilhos). As superfícies dos discos não apresentaram trincas visíveis a olho nu.

Maya-Johnson (2017) ensaiou discos de roda e de trilho ferroviários com condições similares (1,1 GPa, 5% de escorregamento e contato seco) no mesmo tribômetro utilizado nesse trabalho e as superfícies ensaiadas apresentaram condições similares às da Figura 4.35, porém com a adição de um modificador de atrito (água) foi visualizado *shelling* a partir de 20.000 ciclos.

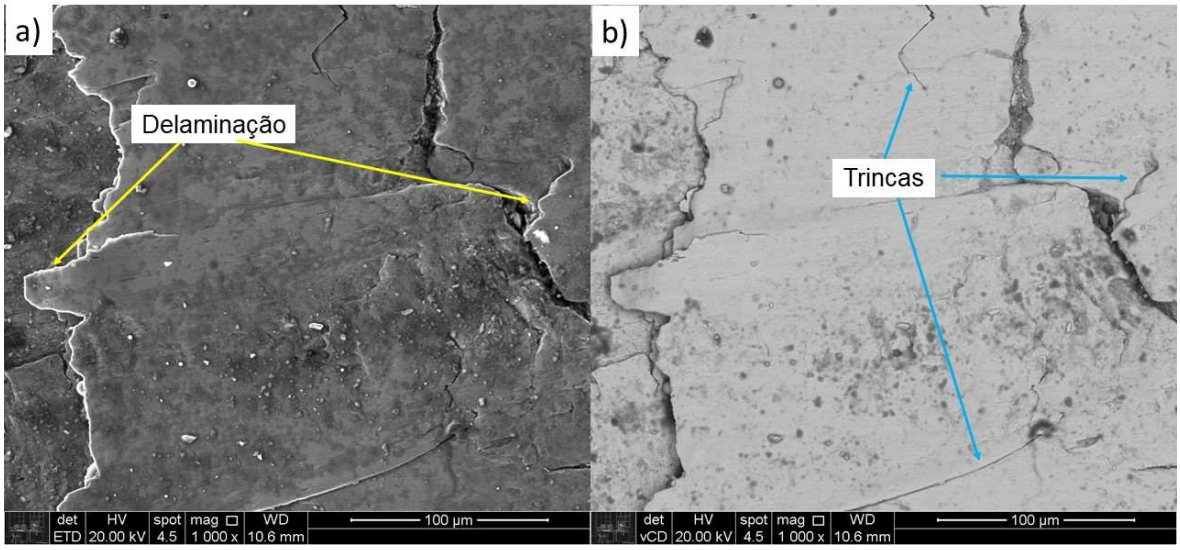
Figura 4.35 - Aspecto da superfície dos discos de roda e trilho após os ensaios de desgaste por rolamento com 5% de escorregamento para cada vida de uma roda ferroviária microligada.



Roda - Trilho (a) 1° vida | Roda – Trilho (b) 2° vida | Roda - Trilho (c) 3° vida

Na Figura 4.36 é encontrado o aspecto da superfície de desgaste do disco de roda ferroviária na 1° vida (microestrutura bainítica) após o ensaio de desgaste por rolamento com 5% de escorregamento. As imagens foram obtidas utilizando um MEV com detector de elétrons secundários (Figura 4.36(a)) e com detector de elétrons retroespalhados (Figura 4.36(b)). Nota-se a presença de delaminação (setas amarelas) caracterizada por camadas deformadas com bordas retas, provavelmente a delaminação ocorreu devido à coalescência de trincas de fadiga de contato por rolamento, as setas azuis indicam tais trincas.

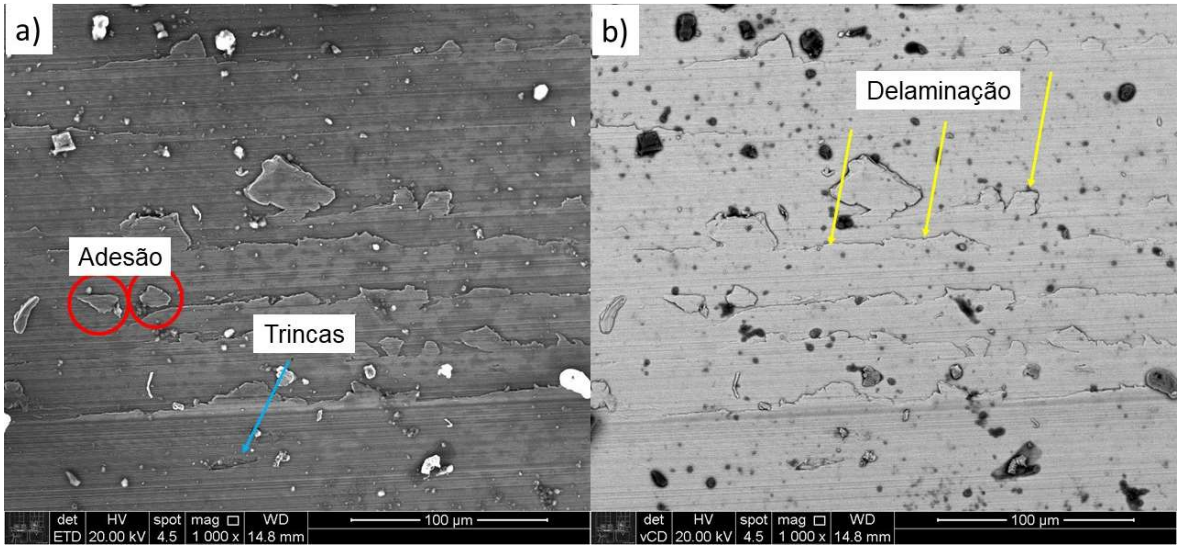
Figura 4.36 – Aspecto da superfície de desgaste da 1° vida de uma roda ferroviária microligada após ensaio de desgaste por rolamento de configuração disco contra disco com 5% de escorregamento. a) SE – 1.000x b) BSC – 1.000x. Sem ataque. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A Figura 4.37 apresenta o aspecto da superfície de desgaste após o ensaio de desgaste por rolamento com 5% de escorregamento para a amostra de 2° vida de roda ferroviária (microestrutura mista de bainita e perlita). As imagens foram obtidas por meio de um MEV com detector de elétrons secundários (Figura 4.37 (a)) e com detector de elétrons retroespalhados (Figura 4.37(b)).

A presença de delaminação continua dominante na superfície conforme indicado pelas setas amarelas, as setas azuis apontam trincas superficiais. É observada também a presença de desgaste por adesão (círculos vermelhos), as partículas aderidas apresentam a mesma coloração que a superfície do disco na Figura 4.37(b) obtida a partir de um detector de elétrons retroespalhados, sugerindo que não representa um óxido, mas sim uma partícula de material metálico semelhante aos discos.

Figura 4.37 - Aspecto da superfície de desgaste da 2° vida de uma roda ferroviária microligada após ensaio de desgaste por rolamento de configuração disco contra disco com 5% de escorregamento. a) SE – 1.000x b) BSC – 1.000x. Sem ataque. (MEV-FEG) (PMT-USP).

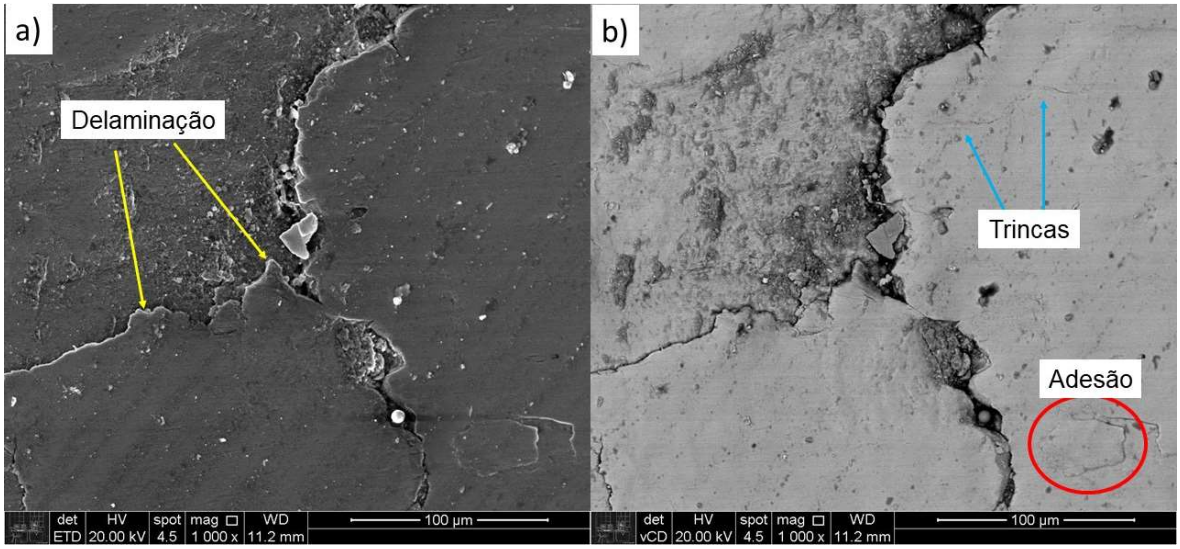


O aspecto da superfície de desgaste para a amostra de 3° vida de roda ferroviária (microestrutura perlítica) após o ensaio de desgaste com 5% de escorregamento é visualizado na Figura 4.38. As imagens foram obtidas por meio de um MEV com detector de elétrons secundários (Figura 4.38 (a)) e com detector de elétrons retroespalhados (Figura 4.38 (b)).

As setas azuis indicam as trincas decorrentes da fadiga de contato por rolamento e as setas amarelas apontam indícios de delaminação. Sinais de adesão são semelhantes aos encontrados nas amostras de segunda vida e também estão indicados por círculos vermelhos na Figura 4.38(b). As partículas aderidas nas amostras de terceira vida são maiores do que as observadas na superfície das amostras de segunda vida.

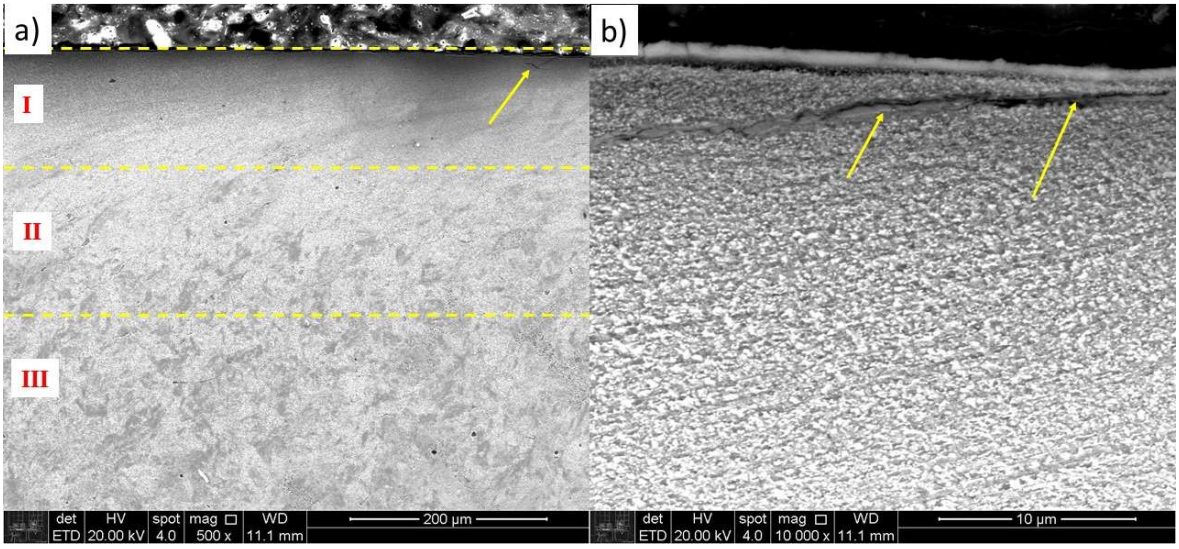
Devido à severidade do desgaste não foram encontradas camadas de óxidos nas amostras das três vidas de uma roda ferroviária (Figura 4.36, Figura 4.37 e Figura 4.38). As partículas aderidas foram caracterizadas como sendo metálicas.

Figura 4.38 - Aspecto da superfície de desgaste da 3° vida de uma roda ferroviária microligada após ensaio de desgaste por rolamento de configuração disco contra disco com 5% de escorregamento. a) SE – 1.000x b) BSC – 1.000x. Sem ataque. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A Figura 4.39 apresenta o aspecto da microestrutura encontrada, após os ensaios disco contra disco, na seção perpendicular à superfície do disco de 1° vida da roda ferroviária microligada (microestrutura bainítica). A caracterização consta de uma perspectiva geral com 500x de aumento (Figura 4.39(a)) e uma com melhor detalhamento da região deformada com 10.000x de aumento (Figura 4.39(b)). Na Figura 4.39(a) mostra-se como é dividida a superfície ensaiada em três regiões distintas: na Região I (mais adjacente à superfície) a deformação plástica é mais acentuada e são observadas trincas superficiais e subsuperficiais além da microestrutura perder o seu formato característico; na Região II a deformação plástica é menos acentuada e a configuração microestrutural original permanece; já na Região III o material não apresenta alteração visível. As trincas encontradas nas imagens estão indicadas pelas setas amarelas. Um estudo detalhado das trincas foi realizado analisando diversas imagens da seção perpendicular à superfície, as trincas apresentaram comprimento máximo de 17 ± 10 µm, profundidade máxima de 5 ± 1 µm e 14 ± 9 ° de ângulo de abertura.

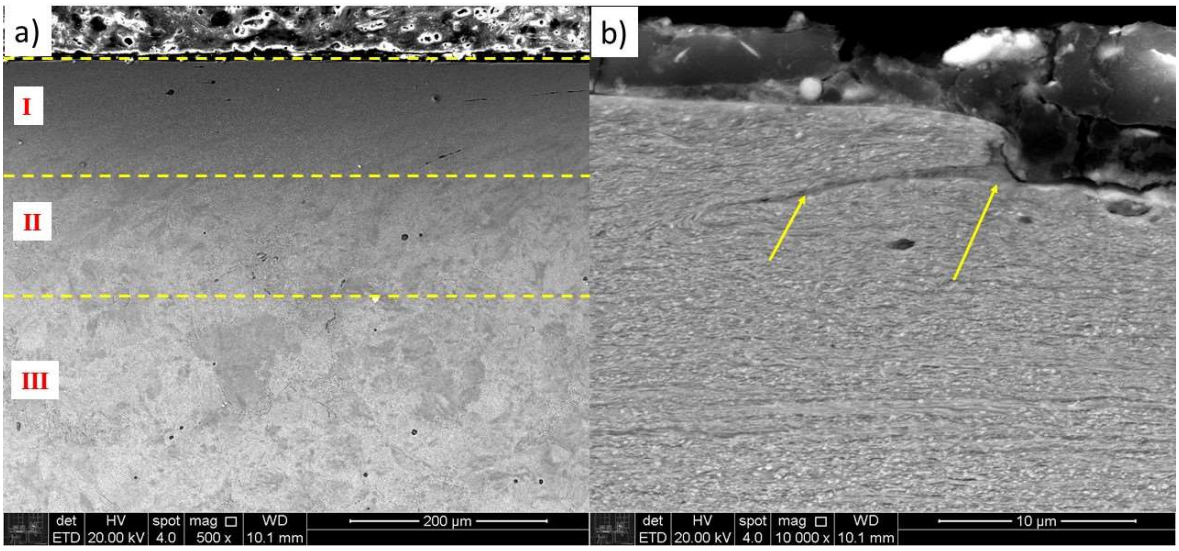
Figura 4.39 - Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do disco de material de roda ferroviária microligada fundida proveniente do ensaio disco-disco para 1° vida com 5% de escorregamento. a) SE - 500x b) SE - 10.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



O aspecto da camada deformada na seção perpendicular à superfície do disco de roda ferroviária microligada para a 2° vida (microestrutura mista de perlita e bainita) é apresentado na Figura 4.40(a) com 500x de aumento e na Figura 4.40(b) com 10.000x de aumento. As três regiões distintas encontradas nas amostras de 1° vida (bainita) são constatadas também na amostra de 2° vida e indicadas na Figura 4.40(a).

A espessura dessas três camadas é similar à encontrada na amostra de primeira vida, são constatadas também trincas superficiais e subsuperficiais que estão indicadas pelas setas amarelas na Figura 4.40(b). As trincas apresentaram comprimento máximo de 27 ± 3 µm, profundidade máxima de 4 ± 1 µm e 8 ± 4° de ângulo de abertura. O comprimento das trincas para esta estrutura (segunda vida) é consideravelmente maior e o ângulo de abertura menor do que na primeira vida. Aparentemente nessa mistura de fases (microestrutura heterogênea) as trincas se propagam com mais facilidade.

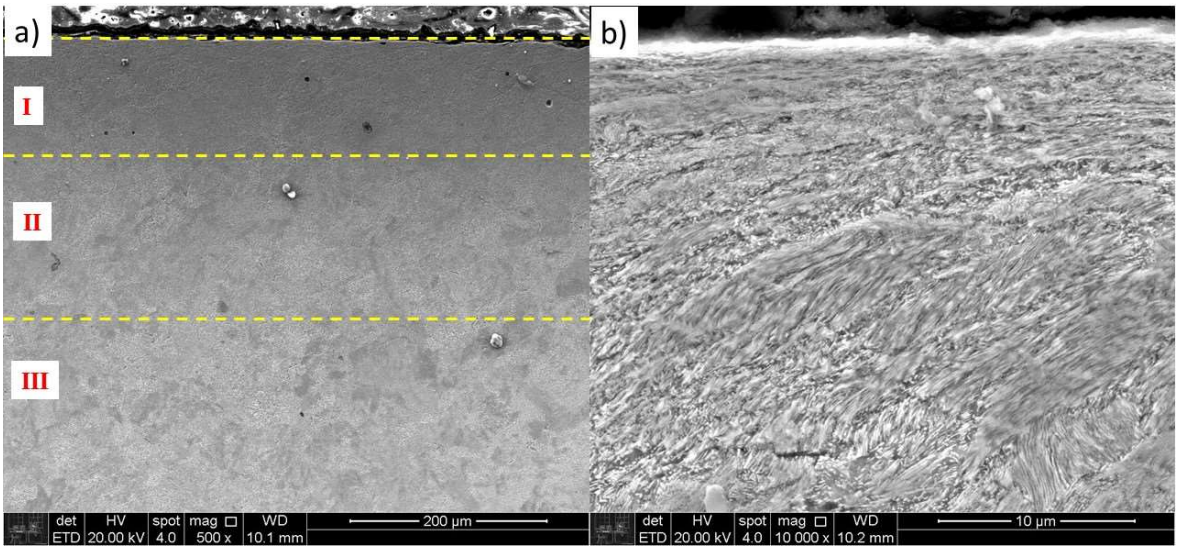
Figura 4.40 - Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do disco de material de roda ferroviária microligada fundida proveniente do ensaio disco-disco para 2° vida com 5% de escorregamento. a) SE - 500x b) SE - 10.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A Figura 4.41 apresenta o aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície após os ensaios de desgaste por rolamento para a 3° vida de uma roda ferroviária microligada (microestrutura perlítica). A Figura 4.41(a) possui 500x de aumento e a Figura 4.41(b) 10.000x de aumento. As três regiões observadas para as outras vidas anteriores foram encontradas também na 3° vida, porém não foram encontradas trincas nas imagens da seção perpendicular à superfície. Além disso, percebe-se que a espessura da camada severamente deformada (região I) é similar nas três vidas.

A microestrutura perlítica manteve a sua lamelaridade até em regiões muito próximas à superfície de desgaste, essa mesma característica da microestrutura perlítica foi observada nos ensaios de deslizamento puro do tipo pino contra disco utilizando as mesmas amostras de roda ferroviária microligada (apresentado na Figura 4.17). Essa habilidade da perlita em manter a sua lamelaridade também foi reportada por Chaves (2020) em ensaios de deslizamento puro do tipo pino contra disco com aço 1080.

Figura 4.41 - Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do disco de material de roda ferroviária microligada fundida proveniente do ensaio disco-disco para 3° vida com 5% de escorregamento. a) SE - 500x b) SE - 10.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



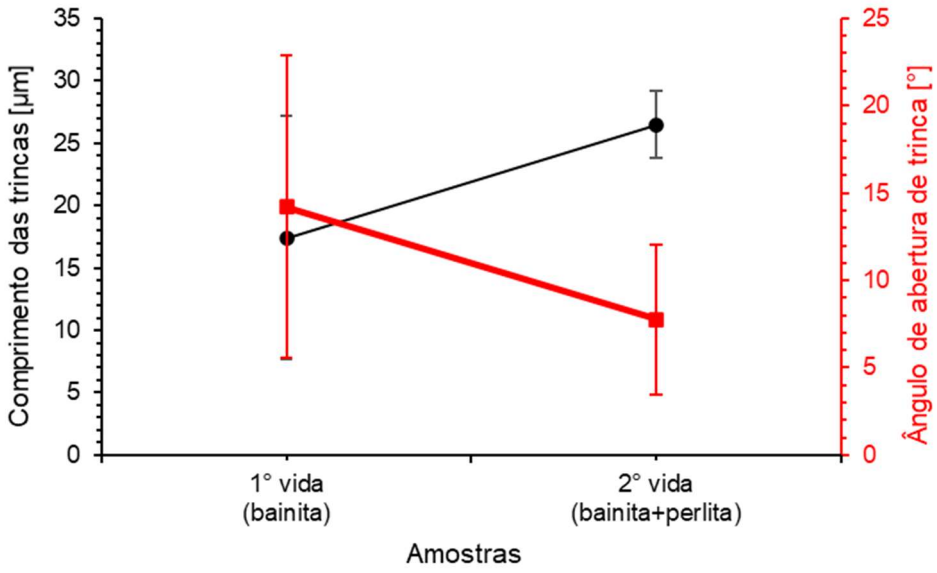
Na Tabela 4.13 são apresentados o comprimento máximo das trincas, profundidade máxima das trincas e o ângulo de abertura encontrados após os ensaios de desgaste por rolamento com 5% de escorregamento com configuração disco contra disco para as múltiplas vidas de uma roda ferroviária fundida microligada.

Nas amostras de 3° vida (microestrutura perlítica) não foram encontradas trincas nas imagens seção perpendicular à superfície. Essa ausência de trincas pode ser explicada devido ao desgaste eliminar a camada superficial das amostras onde eram encontradas as trincas. As profundidades máximas das trincas encontradas nas amostras de 1° e 2° vidas não apresentam diferenças significativas ao nível de 5% de significância quando aplicados testes F do método da análise da variância (ANOVA) para avaliar a igualdade entre médias (COSTA NETO, 2002). Já os valores de comprimento e ângulo de abertura das trincas, mesmo ao nível de 1% de significância, apresentaram diferenças significativas. As amostras de 2° vida (microestrutura mista de bainita e perlita) apresentaram as trincas mais longas e com ângulo de abertura menor, conforme visualizado na Figura 4.42.

Tabela 4.13 – Estudo da morfologia de trincas encontradas nas imagens da seção perpendicular à superfície após os ensaios de desgaste por rolamento com 5% de escorregamento para múltiplas vidas de uma roda ferroviária.

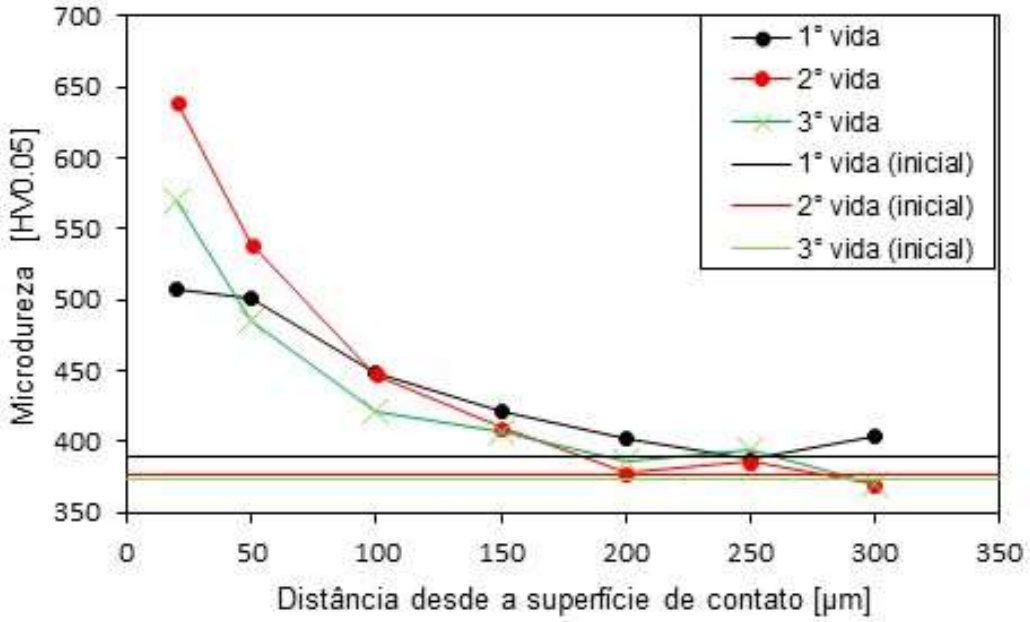
Amostra	Comprimento máximo das trincas [µm]	Profundidade máxima das trincas [µm]	Ângulo de abertura [°]
1° vida	17 ± 10	5 ± 1	14 ± 9
2° vida	27 ± 3	4 ± 1	8 ± 4
3° vida	-	-	-

Figura 4.42 – Comprimento e ângulo de abertura de trincas em função da microestrutura após os ensaios de desgaste por rolamento com 5% de escorregamento para múltiplas vidas de uma roda ferroviária.



Os perfis de microdureza Vickers dos discos correspondentes às múltiplas vidas de uma roda ferroviária após os ensaios de desgaste por rolamento com 5% de escorregamento são apresentados na Figura 4.43. Nota-se em todas as amostras o aumento da dureza em regiões adjacentes à superfície de desgaste, quanto mais distante dessa superfície, menores são os valores de dureza, de forma que em regiões distantes 200 µm, esses valores são próximos aos encontrados antes dos ensaios de desgaste para cada vida.

Figura 4.43 - Variação da microdureza dos discos de roda ferroviária em suas múltiplas vidas em função da distância desde a superfície de contato após os ensaios de desgaste por rolamento com 5% de escorregamento.



A Tabela 4.14 apresenta os valores de microdureza encontrados para cada amostra e distância, bem como o aumento percentual em relação à dureza inicial do material antes dos ensaios de desgaste. A amostra de 2° vida (matriz perlítica com bainita) obteve o maior endurecimento próximo à superfície atingindo 640 HV (70% de aumento). A amostra com microestrutura bainítica (1° vida), por sua vez, mostrou o menor endurecimento na mesma região, alcançando 507 HV (30% de aumento).

De forma similar ao observado nos ensaios de desgaste por deslizamento puro (ensaios com configuração pino contra disco), as amostras com matriz perlítica obtiveram maior endurecimento superficial por deformação plástica conforme apresentado na Tabela 3.10 para o aço 1080 e na Tabela 4.7 para as múltiplas vidas de uma roda ferroviária.

Tabela 4.14 – Variação da microdureza dos discos de material de roda ferroviária em função da distância desde a superfície de contato após os ensaios de desgaste por rolamento com 5% de escorregamento.

Amostra	Distância desde a superfície de contato [µm]						
	20	50	100	150	200	250	300
	Valores em HV [% de aumento em relação à dureza inicial]						
1° Vida	507 [30%]	501 [29%]	449 [15%]	421 [8%]	401 [3%]	388 [0%]	403 [4%]
2° Vida	640 [70%]	539 [43%]	447 [19%]	410 [9%]	378 [0%]	385 [2%]	370 [-2%]
3° Vida	570 [52%]	485 [30%]	421 [13%]	406 [9%]	386 [3%]	393 [5%]	370 [-1%]

Na Tabela 4.15 são apresentados os resultados consolidados após os ensaios de desgaste por rolamento com diferentes porcentagens de escorregamento para as múltiplas vidas de uma roda ferroviária.

Tabela 4.15 - Resultados consolidados dos ensaios de desgaste por rolamento com diferentes porcentagens de escorregamento do tipo disco contra disco para múltiplas vidas de uma roda ferroviária.

Amostra	Dureza inicial [HV]	Dureza superficial após os ensaios [HV]	Microestrutura	Espaçamento lamelar médio da perlita [nm]	Espessura da camada deformada [µm]	Presença de sinais de adesão na superfície	COF médio para 0,5% de escorregamento	COF médio para 5% de escorregamento
1° vida	389	507	Bainita	-	200	Não	0,31	0,55
2° vida	376	640	Perlita + Bainita	73	200	Sim	0,28	0,55
3° vida	374	570	Perlita	93	200	Sim	0,17	0,54

Após a realização de ensaios de desgaste de configuração disco contra disco com diferentes escorregamentos, notou-se que para maiores escorregamentos a perda de massa e o coeficiente de atrito são maiores para todas as vidas. Além disso, quanto maior o escorregamento, mais rápida será a estabilização do coeficiente de atrito (menor período de *running-in*).

Nas imagens da superfície de desgaste dos discos não foram encontrados sinais de adesão nas amostras bainíticas (1° vida). Indícios de delaminação e

trincas superficiais foram visualizadas em todas as vidas das amostras de roda ferroviária microligada.

Já nas imagens obtidas da seção perpendicular à superfície, apenas nas amostras predominantemente perlíticas (3° vida) não foram encontradas trincas. Devido à essa ausência de trincas, pode-se supor que a 3° vida possui melhor resistência ao início de RCF. O RCF é definido como a falha do material devido ao coalescimento e propagação de trincas de fadiga.

A microestrutura perlítica manteve a sua estrutura lamelar característica, mesmo em regiões severamente deformadas. As amostras com microestrutura mista (matriz perlítica com bainita) apresentaram as trincas mais longas e com menor ângulo de abertura.

Analisando o parâmetro T-gamma e a taxa de desgaste conforme proposto por Lewis e Olofsson (2004), os ensaios apresentaram regime moderado de desgaste (regime I) para escorregamentos de até 3% e regime severo de desgaste (regime II) para 5% de escorregamento.

4.2.2.4 Resistência à fadiga de contato por rolamento - RCF

A Tabela 4.16 mostra o número de ciclos rodados até o início do *shelling*, quando é observado uma mudança significativa no regime de vibração indicado pelo equipamento e pode ser confirmado devido à presença de *debris* metálicos. Todos os ensaios foram realizados até 250.000 ciclos.

As amostras da terceira vida (microestrutura perlítica) apresentaram um maior tempo (melhor resistência) até o início de *shelling* quando comparadas às amostras das demais vidas. Além disso, a terceira vida também obteve um comportamento menos disperso entre as réplicas, ou seja, apresentou um menor desvio padrão.

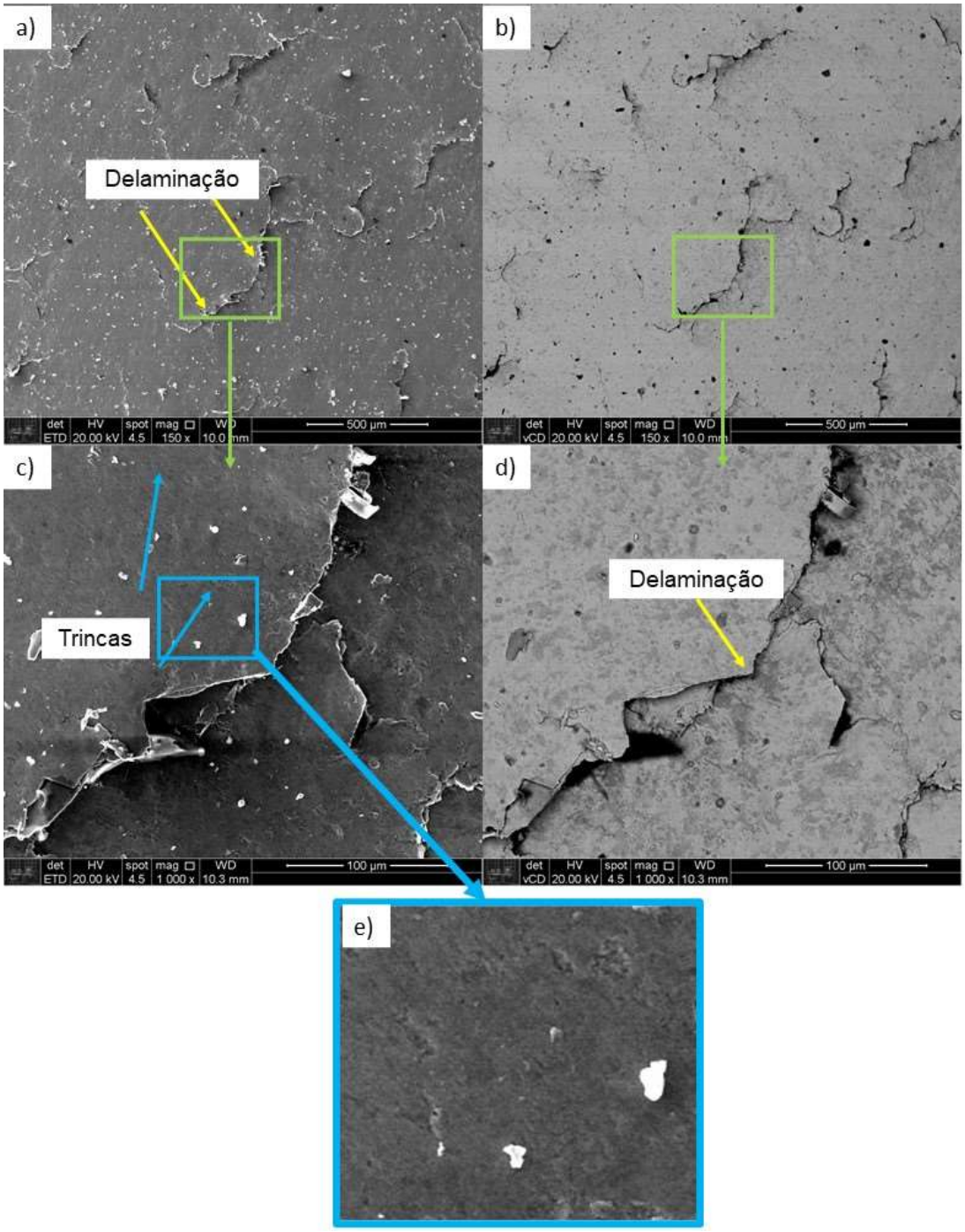
Tabela 4.16 – Número de ciclos necessários para início de *shelling*. Resumo dos resultados dos ensaios de resistência à fadiga de contato utilizando um tribômetro do tipo disco contra disco.

Amostra	**Ciclos até o início de *shelling***		
	Teste A	**Teste B**	**Média e Desvio Padrão**
1° vida	128.000	103.000	115.500 ± 17.677
2° vida	110.000	94.000	102.000 ± 11.310
3° vida	209.000	210.000	209.500 ± 707

O aspecto da superfície de desgaste após os ensaios do tipo disco contra disco para avaliar a resistência à fadiga de contato por rolamento para as diferentes microestruturas encontradas nas múltiplas vidas de uma roda ferroviária fundida microligada é apresentado na Figura 4.44, na Figura 4.45 e na Figura 4.46. Essas imagens foram obtidas com um microscópio eletrônico de varredura utilizando um detector de elétrons secundários (SE) e um detector de elétrons retroespalhados (BSC). Para cada vida são apresentadas quatro imagens, duas com ampliação de 150x e duas com ampliação de 1.000x. As superfícies foram analisadas sem ataque químico para melhor visualização da topografia e características superficiais.

A Figura 4.44 mostra o aspecto da superfície para a amostra de 1° vida (microestrutura bainítica). Nota-se a ocorrência de delaminação em toda a extensão da superfície (setas amarelas), pequenas trincas superficiais indicadas pelas setas azuis e nenhum indício de adesão. As trincas superficiais são muito sutis e de difícil visualização com 150x e 1.000x de aumento, para melhor observação na Figura 4.44(e) é apresentado um detalhe ampliado da Figura 4.44(c).

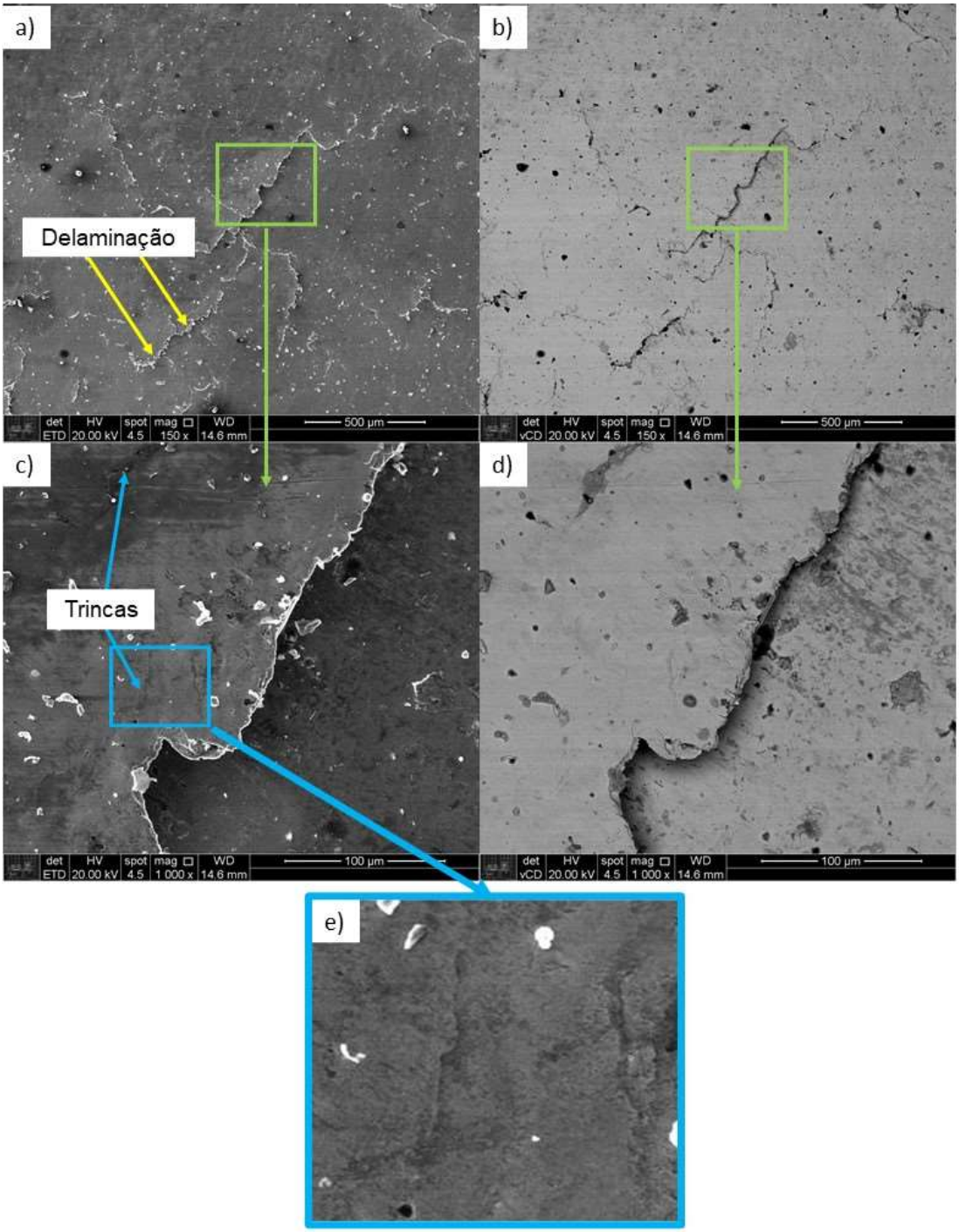
Figura 4.44 - Aspecto da superfície de desgaste da 1° vida de uma roda ferroviária microligada após ensaio de RCF. a) SE - 150x b) BSC - 150x c) SE – 1.000x d) BSC - 1.000x e) detalhe das trincas. Sem ataque. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A caracterização da superfície deformada da segunda vida da roda estudada é apresentada na Figura 4.45. Observa-se que as características da superfície encontradas são similares às observadas nas amostras da 1° vida. Constata-se a presença de trincas (setas azuis), delaminação (setas amarelas) e também

ausência de adesão superficial. Um detalhe ampliado da Figura 4.45(c) é mostrado na Figura 4.45(e) para melhor visualização das trincas superficiais.

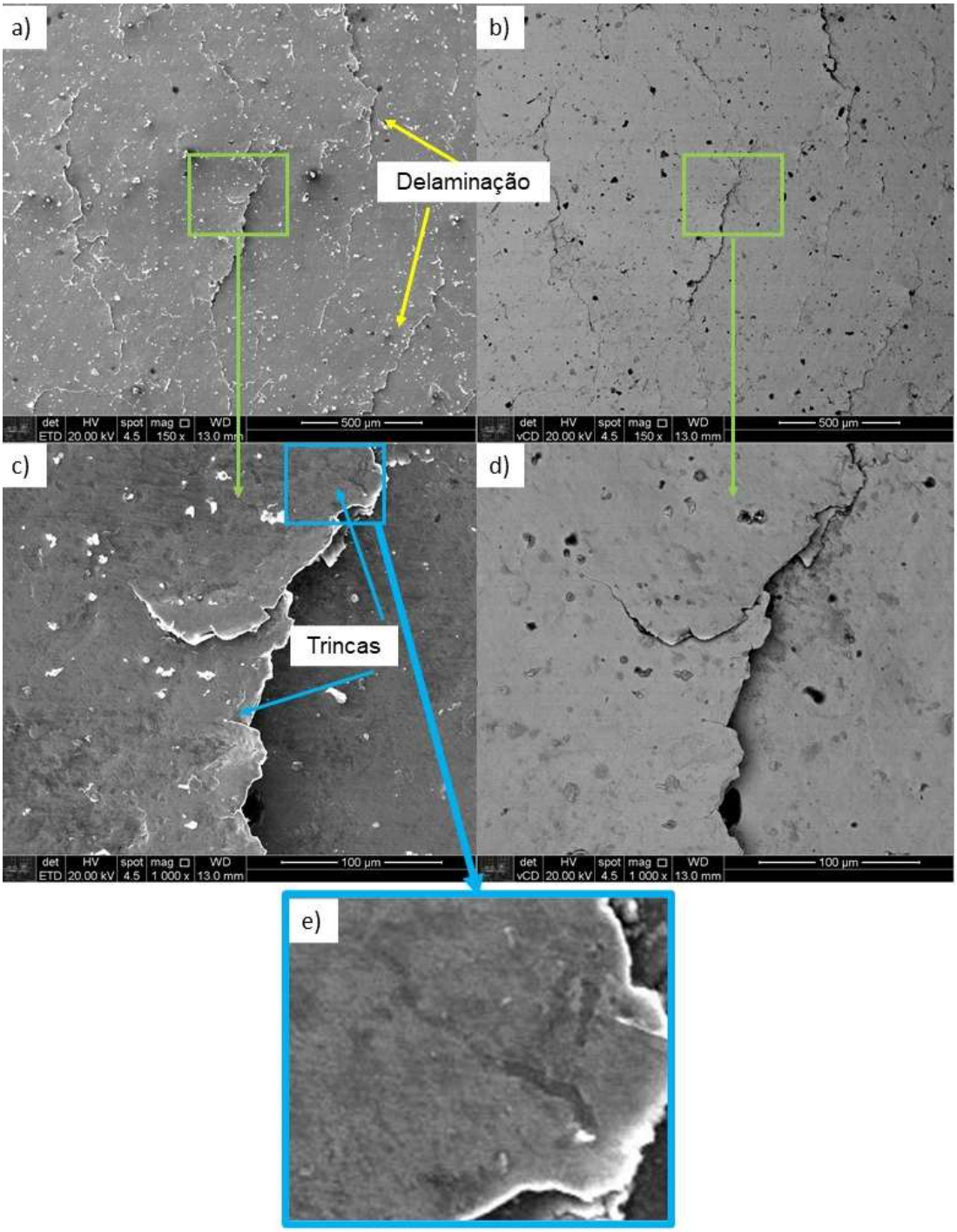
Figura 4.45 - Aspecto da superfície de desgaste da 2° vida de uma roda ferroviária microligada após ensaio de RCF. a) SE - 150x b) BSC - 150x c) SE – 1.000x d) BSC - 1.000x e) detalhe das trincas. Sem ataque. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A Figura 4.46 exibe a superfície do disco de roda ferroviária na sua 3° vida (microestrutura perlítica) após o ensaio de resistência à fadiga de contato por rolamento. De forma semelhante às outras vidas já apresentadas, não são

visualizados sinais de adesão e são encontradas evidências de delaminação (setas amarelas) e trincas (setas azuis).

Figura 4.46 - Aspecto da superfície de desgaste da 3° vida de uma roda ferroviária microligada após ensaio de RCF. a) SE - 150x b) BSC - 150x c) SE – 1.000x d) BSC - 1.000x e) detalhe das trincas. Sem ataque. (MEV-FEG) (PMT-USP).

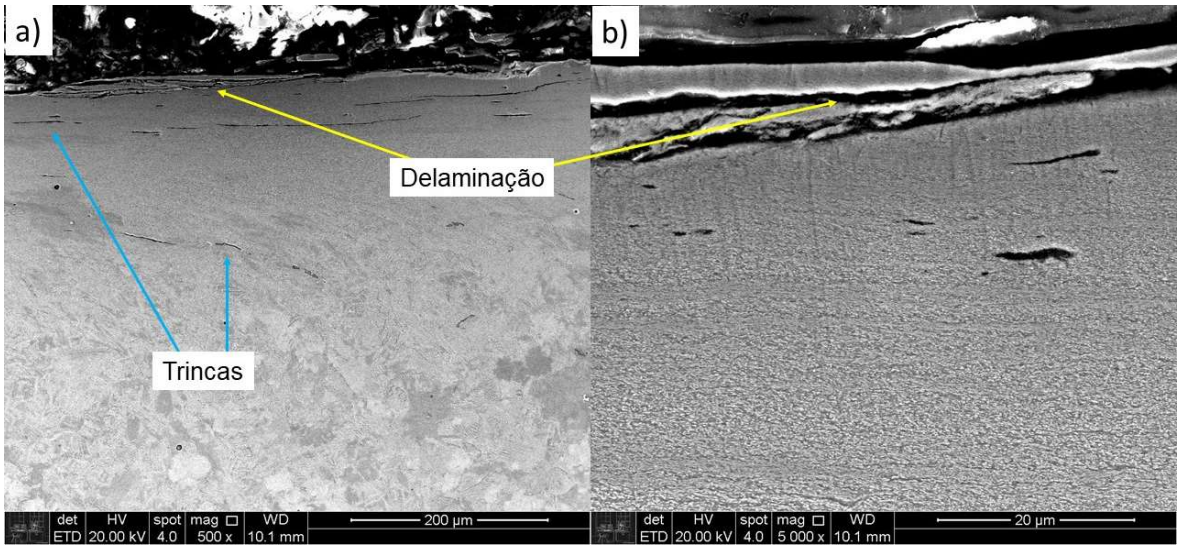


Nas figuras a seguir são apresentadas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da seção perpendicular à superfície dos discos de múltiplas

vidas de uma roda ferroviária fundida microligada após os ensaios de resistência à fadiga por rolamento com configuração disco contra disco. As amostras foram atacadas quimicamente com Nital e para cada vida são apresentados dois aumentos, 500x e 5.000x.

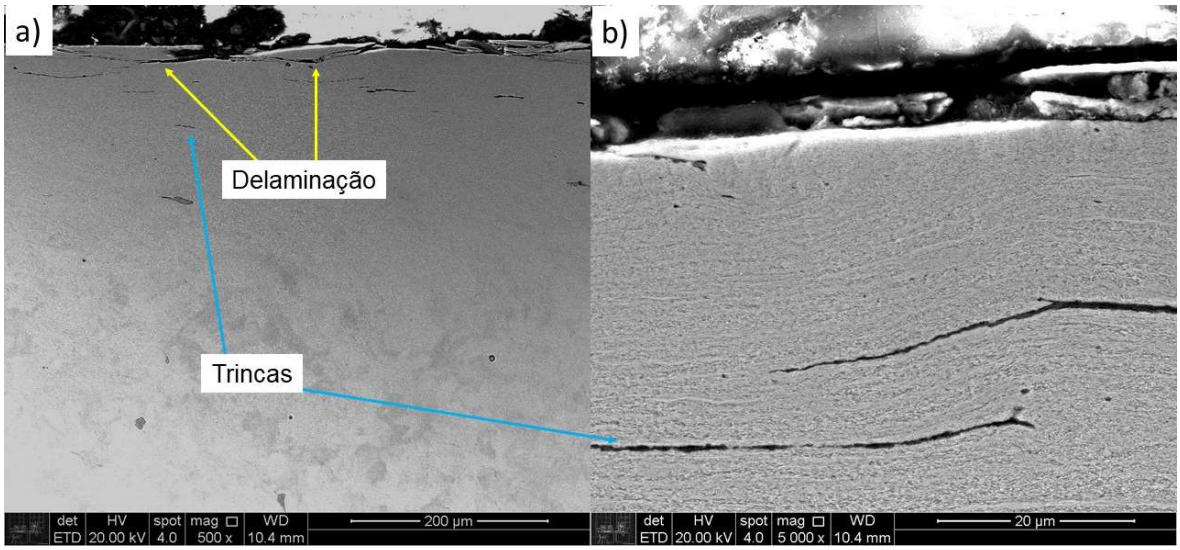
Na Figura 4.47 são apresentadas imagens de MEV para a amostra bainítica (primeira vida), são encontradas trincas superficiais (setas azuis) e delaminação (setas amarelas) causada pelo coalescimento de trincas superficiais originadas por fadiga de contato por rolamento. As trincas nas amostras bainíticas foram encontradas em até 180 ± 20 µm de profundidade, com comprimento médio de 121 ± 58 µm e 12 ± 4 ° de ângulo de abertura, são as trincas mais profundas quando comparadas às outras microestruturas.

Figura 4.47 - Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do disco material de roda ferroviária microligada fundida proveniente do ensaio de RCF para 1° vida. a) SE - 500x b) SE - 5.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



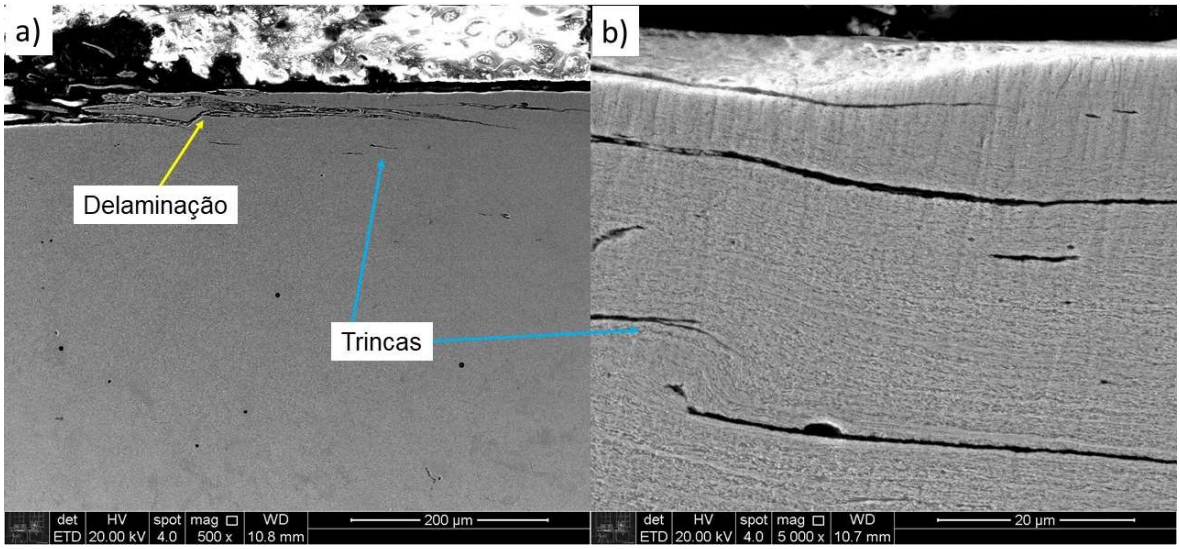
A Figura 4.48 exibe o aspecto da microestrutura encontrada no disco de 2° vida (microestrutura mista de perlita e bainita) de roda ferroviária após o ensaio de resistência à fadiga de contato, regiões com delaminação de material estão indicadas pelas setas amarelas e as trincas pelas setas azuis. Nessas amostras, as trincas apresentaram comprimento médio de 93 ± 37 µm, 10 ± 1 ° de ângulo de abertura e 130 ± 10 µm de profundidade. Alves (2000), em seus estudos, encontrou trincas de morfologia similar na seção transversal após ensaios de desgaste disco-disco com material de roda e trilho ferroviários.

Figura 4.48 - Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do disco material de roda ferroviária microligada fundida proveniente do ensaio de RCF para 2° vida. a) SE - 500x b) SE - 5.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



Na Figura 4.49 são apresentadas imagens da microestrutura da seção perpendicular à superfície do disco de material de 3° vida (amostra perlítica) após o ensaio de resistência à fadiga de contato. As setas azuis apontam para as trincas e as setas amarelas para regiões com delaminação de material. Nota-se que nessa microestrutura a presença de trincas é menor e essas são encontradas apenas em regiões mais próximas à superfície. As trincas nas amostras perlíticas apresentaram 240 ± 60 µm de comprimento médio, 105 ± 35 µm de profundidade e 7 ± 3 ° de ângulo de abertura.

Figura 4.49 - Aspecto da microestrutura encontrada na seção perpendicular à superfície do disco material de roda ferroviária microligada fundida proveniente do ensaio de RCF para 3° vida. a) SE - 500x b) SE - 5.000x. Ataque Nital 2%. (MEV-FEG) (PMT-USP).



A profundidade máxima, comprimento e o ângulo de abertura das trincas encontradas após os ensaios de fadiga de contato por rolamento com configuração disco contra disco para cada uma das vidas de uma roda ferroviária são comparadas na Tabela 4.17. Aplicando testes F do método da análise de variância (ANOVA) descrito por Costa Neto (2002) para testar a igualdade entre médias, verificou-se que os ângulos de abertura de trinca não apresentaram diferenças significativas entre as três vidas ao nível de 5% de significância e podem ser considerados similares.

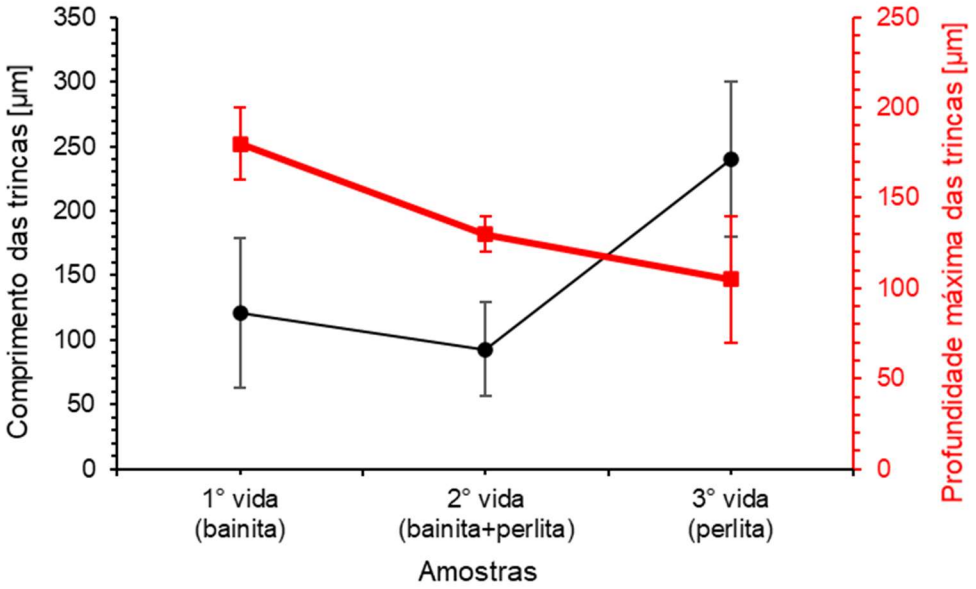
Os valores de comprimento das trincas não apresentaram diferenças significativas entre as duas primeiras vidas (microestruturas bainíticas e mistas) e os valores de profundidade máxima de trincas não apresentaram diferenças significativas entre as duas últimas vidas (microestruturas mistas e perlíticas), conforme verificado aplicando testes F realizados ao nível de 5% de significância. Conclui-se então que nas amostras bainíticas foram encontradas as trincas mais profundas e nas amostras perlíticas as trincas com maior comprimento.

Tabela 4.17 – Estudo da morfologia de trincas encontradas nas imagens da seção perpendicular à superfície após os ensaios de fadiga de contato por rolamento para múltiplas vidas de uma roda ferroviária.

Amostra	Comprimento das trincas [µm]	Profundidade máxima das trincas [µm]	Ângulo de abertura [°]
1° vida	121 ± 58	180 ± 20	12 ± 4
2° vida	93 ± 37	130 ± 10	10 ± 1
3° vida	240 ± 60	105 ± 35	7 ± 3

Na Figura 4.50 é ilustrado um gráfico comparativo do comprimento e profundidade de trincas em cada vida de uma roda ferroviária após os ensaios de RCF disco-disco. Todas as amostras apresentaram trincas e delaminação superficial.

Figura 4.50 – Comprimento médio e profundidade máxima das trincas em função da microestrutura após os ensaios de resistência à fadiga de contato por rolamento.



A Figura 4.51 ilustra o perfil de dureza desde a superfície de desgaste dos discos correspondentes às múltiplas vidas de uma roda ferroviária após os ensaios de resistência à fadiga de contato do tipo disco contra disco. Para melhor compreensão, os valores encontrados para cada distância e o aumento percentual em relação à dureza inicial de cada vida são detalhados na

Tabela 4.18. As amostras com microestrutura de matriz perlítica com bainita (2° vida) sofreram o maior endurecimento em regiões próximas a superfície obtendo 79% de aumento percentual em relação à dureza inicial, por outro lado, as amostras

correspondentes à primeira e terceira vidas apresentaram aumentos similares na mesma região (49% e 47% respectivamente). Condição similar foi observada também nas amostras de 2° vida nos ensaios de desgaste por rolamento com 5% de escorregamento (Tabela 4.14).

A amostra perlítica (3° vida) teve a maior camada deformada sendo percebido aumento de dureza em regiões mais distantes da superfície de desgaste, numa profundidade de 300 µm verificou-se uma dureza de 430 HV (15% de acréscimo), em contrapartida, na amostra bainítica (1° vida), em regiões distantes 200 µm da superfície, as medidas de durezas já se aproximaram da dureza inicial (398 HV – 2% superior).

De forma semelhante ao observado para desgaste por deslizamento puro utilizando aço 1080 (vide Tabela 3.10), a perlita com maior espaçamento interlamelar (terceira vida) apresentou uma camada encruada mais espessa quando comparada com a perlita mais fina (segunda vida).

Figura 4.51 - Variação da microdureza dos discos de roda ferroviária em suas múltiplas vidas em função da distância desde a superfície de contato após os ensaios de RCF do tipo disco contra disco.

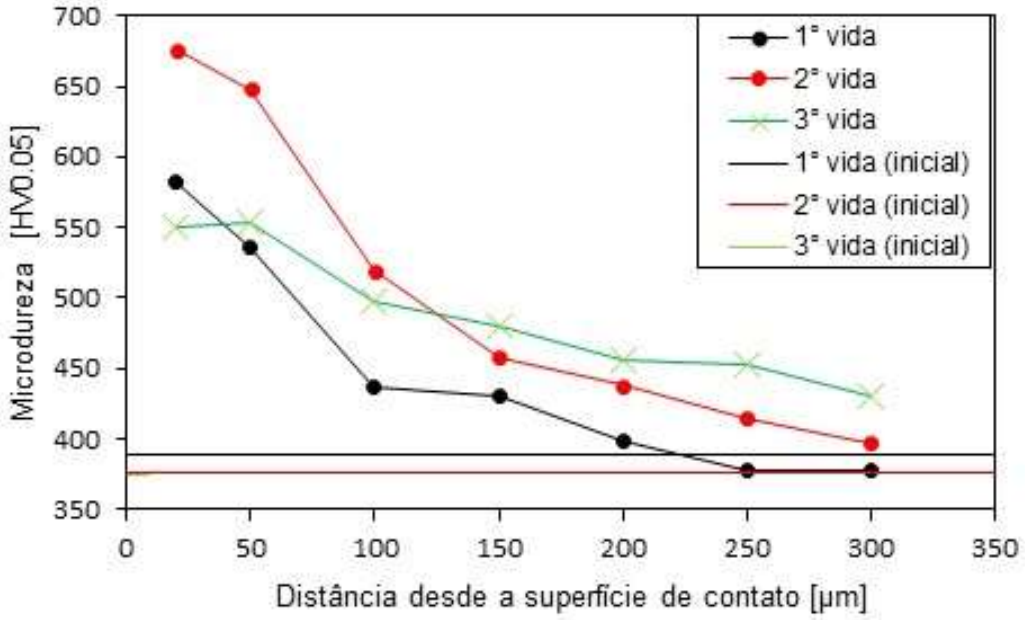


Tabela 4.18 – Variação da microdureza dos discos de material de roda ferroviária em função da distância desde a superfície de contato após os ensaios de RCF do tipo disco contra disco.

Amostra	Distância desde a superfície de contato [µm]						
	20	50	100	150	200	250	300
	Valores em HV [% de aumento em relação à dureza inicial]						
1° Vida	582 [49%]	536 [38%]	437 [12%]	430 [10%]	398 [2%]	378 [-3%]	378 [-3%]
2° Vida	676 [79%]	648 [72%]	520 [38%]	458 [22%]	438 [16%]	415 [10%]	397 [5%]
3° Vida	550 [47%]	554 [48%]	497 [33%]	480 [28%]	456 [22%]	453 [21%]	430 [15%]

Os principais resultados dos ensaios de resistência à fadiga por rolamento para as múltiplas vidas de uma roda ferroviária microligadas foram consolidados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Resultados consolidados dos ensaios de resistência à fadiga por rolamento do tipo disco contra disco para múltiplas vidas de uma roda ferroviária.

Amostra	Dureza inicial [HV]	Dureza superficial após os ensaios [HV]	Microestrutura	Espaçamento lamelar médio da perlita [nm]	Espessura da camada deformada [µm]	Média do número de ciclos até o início de *shelling*
1° vida	389	582	Bainita	-	200	115.500 ± 17.677
2° vida	376	676	Bainita + Perlita	73	300	102.000 ± 11.310
3° vida	374	550	Perlita	93	> 300	209.500 ± 707

Após estudo das imagens obtidas das superfícies desgastadas dos discos depois dos ensaios de resistência à fadiga de contato, foram visualizados sinais de delaminação e trincas em todas as vidas, porém não foram encontrados indícios de adesão. Analisando as imagens da seção perpendicular à superfície das amostras, delaminações e trincas foram encontradas também em todas as vidas e a análise das trincas permitiu avaliar que as amostras bainíticas apresentaram as trincas mais profundas e as amostras perlíticas apresentaram as trincas com maior comprimento.

A maior camada deformada (encruada), correspondente à região com aumento da dureza, foi observada nas amostras com microestrutura perlítica (3° vida). Entretanto a amostra de 2° vida (microestrutura mista) obteve o maior endurecimento superficial.

As amostras com microestrutura mista (2° vida) apresentaram uma tendência de pior desempenho quanto à resistência por fadiga de contato devido provavelmente à heterogeneidade da sua microestrutura. Sabe-se que uma estrutura heterogênea apresenta menor resistência a RCF, pois as trincas podem se propagar mais facilmente entre as interfaces de estruturas com diferentes durezas, essa menor resistência a RCF de microestruturas heterogêneas foi apresentada por Gao em seus estudos (2019).

5 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas para cada um dos estudos realizados são apresentadas a seguir:

- **Material modelo (aço 1080), desgaste por deslizamento puro:**
  - A amostra 550C (perlita fina) obteve a melhor resistência ao desgaste por deslizamento puro e a microestrutura com perlita grosseira (700C), que possuía a menor dureza original, apresentou o maior encruamento superficial.
  - Os ensaios ocorreram em regime de desgaste oxidativo moderado.
- **Múltiplas vidas de uma roda ferroviária, desgaste por deslizamento puro:**
  - No aro de foram encontradas três microestruturas em função da distância desde a superfície de rolamento: bainita (10 mm); bainita, perlita e ferrita em contorno de grão (30 mm); perlita com ferrita em contorno de grão (50 mm).
  - A perlita tem a capacidade de manter mais coesa a sua microestrutura, até em regiões severamente deformadas é possível encontrar indícios de lamelaridade.
  - A microestrutura bainítica (1° vida) apresentou a menor resistência ao desgaste por deslizamento puro.
  - Os ensaios ocorreram em regime de desgaste oxidativo moderado.
- **Múltiplas vidas de uma roda ferroviária, desgaste por rolamento com escorregamento variável:**
  - Maiores escorregamentos geraram maior perda de massa para rodas e trilhos e promoveram menores períodos de *running-in*. A partir de 3% de escorregamento o coeficiente de atrito tendeu a se estabilizar.
  - Nas amostras perlíticas (3° vida) não foram encontradas trincas superficiais e a superfície de contato apresentou maior deformação plástica.
- **Múltiplas vidas de uma roda ferroviária, resistência à fadiga de contato por rolamento:**

- As amostras perlíticas (3° vida) apresentaram melhor resistência ao início de *shelling* e consequentemente melhor resistência à fadiga de contato por rolamento.

Considerando os resultados e conclusões exibidos, a microestrutura perlítica apresentou melhor resistência ao desgaste por deslizamento associado a uma maior capacidade de encruamento, como evidenciado pelo aumento da dureza e pela espessura da camada encruada, sobretudo na perlita fina. No desgaste por rolamento com escorregamento o desempenho das estruturas estudadas foi similar, no entanto supõe-se que a perlita pode ser superior devido à menor quantidade de trincas internas. Sugere-se que a microestrutura de rodas ferroviárias seja preferencialmente perlítica ou até mesmo bainítica desde que seja evitada uma microestrutura heterogênea.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros os seguintes estudos:

a) avaliar a resistência ao desgaste por deslizamento, ao desgaste por rolamento com escorregamento e à fadiga de contato por rolamento de outras microestruturas bainíticas;

b) realizar ensaios de desgaste com configuração pino-disco (deslizamento puro) aplicando maiores cargas;

c) executar ensaios de desgaste por rolamento com escorregamento para obtenção da curva de Carter com maiores valores de escorregamentos (10% ou mais);

d) realizar ensaios de resistência à fadiga de contato nas múltiplas vidas de rodas ferroviárias considerando diferentes pressões de contato para avaliar a influência dessa variável.

e) avaliar a resistência à fadiga de contato em rodas ferroviárias microligadas (classe D AAR) com outras composições químicas seguindo o mesmo procedimento utilizado nesse trabalho para avaliar a influência dos elementos de liga.

REFERÊNCIAS

AAR M-107/M-208. Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles. p. 21–60, 2011.

ALVES, L. H. D. **Mecanismos de Desgaste de Rodas Ferroviárias**. [s.l.] Dissertação. Escola Politécnica da USP. Universidade de São Paulo, 2000.

ARCHARD, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. **Journal of Applied Physics**, v. 24, n. 8, p. 981–988, 1953.

ARCHARD, J. F.; HIRST, W. The wear of metals under unlubricated conditions. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 236, p. 397–410, 1956.

AREMA. Manual for railway engineering. **American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association**, v. Chapter 4, 2010.

ASM HANDBOOK. ASM International. **Volume 1 - Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys**, 2001.

ASTM A1033-10. **Standard Practice for Quantitative Measurement and Reporting of Hypoeutectoid Carbon and Low-Alloy Steel Phase TransformationsASTM Standards**, 2004.

ASTM E384-11. **Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of MaterialsASTM Standards**, 2012.

ASTM E562-11. **Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point CountASTM Standards**, 2011.

ASTM G99-05. **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk ApparatusASTM Standards**, 2010.

BAURI, L. F. **Soldagem de topo com centelhamento de trilhos ferroviários: caracterização microestrutural, propriedades mecânicas e desgaste**. [s.l.] Dissertação. Escola Politécnica da USP. Universidade de Sâo Paulo, 2020.

BEYNON, J. H.; GARNHAM, J. E.; SAWLEY, K. J. Rolling contact fatigue of three pearlitic rail steels. **Wear**, v. 192, p. 94–111, 1996.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels: Microstructure and Properties**. 3° Edition ed. Oxford - UK: Butterworth-Heinemann - Elsevier, 2006.

BLAU, P. J. Interpretations of the friction and wear break-in behavior of metals in sliding contact. **Wear**, v. 71, n. 1, p. 29–43, 1981.

BOLTON, P. J.; CLAYTON, P. Rolling-Sliding Wear Damage in Rail and Tyre Steels. **Wear**, v. 93, p. 145--165, 1984.

BOWER, A. F.; JOHNSON, K. L. Influence of Strain Hardening on Cumulative Plastic Deformation in Rolling and Sliding Contact. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 37, n. 4, p. 471–493, 1989.

CARTER, M. A. On the action of a locomotive driving wheel. **Proceedings of the Royal Society of London.**, v. A112, p. 151–157, 1926.

CHAVES, A. P. G. **Rodas Ferroviárias: Análise, Microestrutura E Propostas De Melhoria**. [s.l.] Dissertação. Escola Politécnica da USP. Universidade de Sâo Paulo, 2017.

CHAVES, A. P. G. et al. Effect of the Microstructure on the Wear Resistance of a Pearlitic Steel. **Materials Research**, v. 23, n. 2, p. 1–8, 2020.

CLAYTON, P.; DEVANATHAN, R. Rolling/sliding wear behavior of a chromium-molybdenum rail steel in pearlitic and bainitic conditions. **Wear**, v. 156, n. 1, p. 121–131, 1992.

DIGGES, T. G.; ROSENBERG, S. J. Heat Treatment and Properties of Iron and Steel. **National Bureau of Standards Monograph 18**, p. 40, 1960.

E140−02. **Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb HardnessASTM Standards**, 2002.

EN-13262. Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheels - Product requirements. n. +A2, 2011.

FONSECA, S. T. DA. **Efeito de adições de vanádio, nióbio e molibdênio na estrutura e propriedades mecânicas de aços com 0,7%C utilizados na fabricação de rodas ferroviárias**. [s.l.] Tese. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, 2015.

GAO, B. et al. Influence of non-uniform microstructure on rolling contact fatigue behavior of high-speed wheel steels. **Engineering Failure Analysis**, v. 100, p. 485–491, 2019.

GENSAMER, M. et al. The Tensile Properties of Pearlite, Bainite, and Spheroidite. **Transactions of American Society for Metals**, v. 30, p. 983–1019, 1942.

HASAN, S. M.; CHAKRABARTI, D.; SINGH, S. B. Dry rolling/sliding wear behaviour of pearlitic rail and newly developed carbide-free bainitic rail steels. **Wear**, v. 408–409, n. May, p. 151–159, 2018.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**. Cambridge: Butterworth-Heinemann - Elsevier, 1992.

KALOUSEK, J.; FEGREDO, D. M.; LAUFER, E. E. The wear resistance and worn metallography of pearlite, bainite and tempered martensite rail steel microstrucutures of high hardness. **Wear**, v. 105, p. 199–222, 1985.

KAPOOR, A.; JOHNSON, K. L. Effect of changes in contact geometry on shakedown of surfaces in rolling/sliding contact. **International Journal of Mechanical Science**, v. 34, n. 3, p. 223–239, 1992.

KRAUSS, G. **Steels: processing, structure and performance**. Ohio - US: ASM International, 2005.

LEE, K. M.; POLYCARPOU, A. A. Wear of conventional pearlitic and improved bainitic rail steels. **Wear**, v. 259, p. 391–399, 2005.

LEEPER, J.; ALLEN, R. (EDS.). **Guidelines to Best Practices For Heavy Haul Railway Operations: Management of the Wheel and Rail Interface - IHHA**.

Virginia USA: Simmons-Boardman Books, Inc., 2015.

LEWIS, R. et al. Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project). **Wear**, v. 430–431, p. 383–392, 2019.

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. Mapping rail wear regimes and transitions. **Wear**, v. 257, n. 7–8, p. 721–729, 2004.

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. **Wheel-rail interface handbook Edited by**. Cambridge: Woodhead publishing limited, 2009.

LIM, S. C.; ASHBY, M. F. Wear-mechanism maps. **Acta Metallurgica**, v. 35, n. 1, p. 1–24, 1987.

LIU, C. P. et al. Influence of contact stress on surface microstructure and wear property of D2/U71Mn wheel-rail material. **Materials**, v. 12, p. 1–14, 2019.

MAGEL, E.; KALOUSEK, J. **Identifying and interpreting railway wheel defects**. IHHA Conference: International Heavy Haul Association Conference on Freight Car Trucks/Bogies. **Anais**...Montreal, Canadá: 1996

MAKINO, T.; KATO, T.; HIRAKAWA, K. The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel. **International Journal of Fatigue**, v. 36, p. 68–79, 2012.

MAYA-JOHNSON, S.; FELIPE SANTA, J.; TORO, A. Dry and lubricated wear of rail steel under rolling contact fatigue - Wear mechanisms and crack growth. **Wear**, v. 380–381, p. 240–250, 2017.

MAYA JOHNSON, S. **Estudio del comportamiento de concentradores de esfuerzo bajo condiciones de fatiga en aceros para rieles**. [s.l.] Tese. Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales. Universidad Nacional de Colombia, 2014.

MEI, P. R. **Efeitos da adição de nióbio na estrutura e propriedades dos aços com médio e alto teor de carbono**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 1983.

MINICUCCI, D. J. et al. Development of niobium microalloyed steel for railway wheel with pearlitic bainitic microstructure. **Materials Research**, v. 22, n. 6, p. 8, 2019.

MUTTON, P. J.; EPP, C. J.; DUDEK, J. Rolling contact fatigue in railway wheels under high axle loads. **Wear**, v. 144, p. 139–152, 1991.

OKAGATA, Y. Design Technologies for Railway Wheels and Future Prospects. **NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT No. 105**, n. 105, p. 26–33, 2013.

PEREIRA, J. I. **Analysis of the microstructure transformation (wel formation) in pearlitic steel used in relevant engineering wear systems**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2018.

PEREZ-UNZUETA, A. J.; BEYNON, J. H. Microstructure and wear resistance of pearlitic rail steels. **Wear**, v. 162–164, p. 173–182, 1993.

POINTNER, P. High strength rail steels - The importance of material properties in contact mechanics problems. **Wear**, v. 265, p. 1373–1379, 2008.

REZENDE, A. B. et al. Wear behavior of bainitic and pearlitic microstructures from microalloyed railway wheel steel. **Wear**, v. 456–457, n. June, p. 203377, 2020.

SEO, J. W. et al. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling-sliding contact. **International Journal of Fatigue**, v. 83, p. 184–194, 2016.

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

SPINOLA BARBOSA, R.; NETO, Á. C. Dinâmica Do Rodeiro Ferroviário Railway Wheelset Dynamics. **Rbcm**, v. XVIII, p. 229, 1996.

STOCK, R. et al. Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application. **Wear**, v. 366–367, p. 225–232, 2016.

TRESSIA, G. **Mapas de dureza de trilhos ferroviários: critério para avaliação**

técnica de trilhos novos. Ouro Preto, MG.Instituto Tecnológico Vale., , 2018.

VIÁFARA, C. C. et al. Unlubricated sliding wear of pearlitic and bainitic steels. **Wear**, v. 259, p. 405–411, 2005.

VIÁFARA, C. C.; SINATORA, A. The effect of hardness of sliding bodies on the wear regime transition of steels. **Lubrication Science**, v. 25, p. 123–138, 2013.

WELSH, N. C. The dry wear of steels I. The general pattern of behaviour. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 257, n. 1077, p. 31–50, 1965.

WILLIAMS, J. A. **The influence of repeated loading, residual stresses and shakedown on the behaviour of tribological contactsTribology International**, 2005.

XIN, T. et al. Three Distinct Deformation Behaviors of Cementite Lamellae in a Cold-Drawn Pearlitic Wire. **Metals and Materials International**, v. 24, p. 840–844, 2018.

ZAPATA, D.; JARAMILLO, J.; TORO, A. Rolling contact and adhesive wear of bainitic and pearlitic steels in low load regime. **Wear**, v. 271, p. 393–399, 2011.

ZENER, C. Kinetics of the Decomposition of Austenite. **American Institute of Mining and Mettalurgical Engineers**, v. 1925, p. 34, 1945.

ZERBST, U.; MÄDLER, K.; HINTZE, H. Fracture mechanics in railway applications - an overview. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 72, p. 163–194, 2005.

ZHUANG, Y. et al. Application of three-dimensional shakedown solutions in railway structure under multiple Hertz loads. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 117, n. December 2018, p. 328–338, 2019.

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