



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

RENAN CARREIRO ROCHA

Estudo do efeito do escorregamento e da temperatura na  
resistência ao desgaste de um aço de roda ferroviária  
classe C usando o tribômetro disco-contra-disco

CAMPINAS

2023

RENAN CARREIRO ROCHA

Estudo do efeito do escorregamento e da temperatura na  
resistência ao desgaste de um aço de roda ferroviária  
classe C usando o tribômetro disco-contra-disco

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia  
Mecânica da Universidade Estadual de Campinas  
como parte dos requisitos exigidos para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia Mecânica na  
área de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. PAULO ROBERTO MEI

Coorientador: Prof. Dr. ANDREI BAVARESCO REZENDE

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO  
RENAN CARREIRO ROCHA E ORIENTADO  
PELO PROF. DR. PAULO ROBERTO MEI

CAMPINAS

2023

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R582e Rocha, Renan Carreiro, 1987-  
Estudo do efeito do escorregamento e da temperatura na resistência ao desgaste de um aço de roda ferroviária classe C usando o tribômetro disco-contra-disco / Renan Carreiro Rocha. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Paulo Roberto Mei.  
Coorientador: Andrei Bavaresco Rezende.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Tribologia. 2. Materiais - Propriedades mecânicas. 3. Materiais - Fadiga. 4. Desgaste mecânico. I. Mei, Paulo Roberto, 1953-. II. Rezende, Andrei Bavaresco, 1991-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Study of the effect of slip and temperature on the wear resistance of a class C railway wheel steel using a twin disc tribometer

**Palavras-chave em inglês:**

Tribology

Materials - Mechanical properties

Materials - Fatigue

Mechanical wear

**Área de concentração:** Materiais e Processos de Fabricação

**Titulação:** Doutor em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Paulo Roberto Mei [Orientador]

Juliano Soyama

Noé Cheung

Adilto Pereira Andrade Cunha

Givanildo Alves dos Santos

**Data de defesa:** 13-02-2023

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-6673-4328>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1395611889215489>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TESE DE DOUTORADO ACADÊMICO

Autor: Renan Carreiro Rocha.  
Orientador: Professor Dr. Paulo Roberto Mei.  
Coorientador: Professor Dr. Andrei Bavaresco Rezende.

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta tese:

**Prof. Dr. Paulo Roberto Mei**  
DEMM/FEM/Universidade Estadual de Campinas

**Prof. Dr. Juliano Soyama**  
DEMM/FEM/Universidade Estadual de Campinas

**Prof. Dr. Noé Cheung**  
DEMM/FEM/Universidade Estadual de Campinas

**Adilto Pereira Andrade Cunha**  
DEMP/Universidade Estadual do Maranhão

**Givanildo Alves dos Santos**  
DEM/Instituto Federal de São Paulo

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 13 de fevereiro de 2023.

## **Dedicatória**

Dedico a minha esposa e filha, pois vocês entenderam minha ausência e sempre me apoiaram, o que foi fundamental para a conclusão deste trabalho. Aos meus pais que sempre foram grandes incentivadores e me ensinaram, desde cedo, que a educação é transformadora. A minha avó, Luzia Machado Carreiro, que, enquanto esteve entre nós falava com grande alegria, meu neto será doutor! Sua alegria me contagiava!

## Agradecimentos

Ao professor Dr. Paulo Roberto Mei, pelos ensinamentos, liberdade para o desenvolvimento do trabalho e, principalmente, para os questionamentos técnicos ao longo deste estudo, que permitiram meu amadurecimento como pesquisador.

Ao meu coorientador Dr. Andrei Bavaresco Rezende, por compartilhar tanto conhecimento sobre o tribômetro disco-contra-disco e pelas nossas inúmeras discussões por aplicativos de mensagem.

Agora, não mais de maneira nominal, agradeço a todos os amigos que fiz neste percurso. Os integrantes do grupo de pesquisa de Tribologia da FEM/Unicamp, os colegas de disciplinas do DINTER, aos integrantes dos laboratórios LABENDEM do CIPID e LabPetro do CCE-UFES.

Aos amigos do IFES *campus* Cariacica, em especial os professores da coordenação do curso técnico de Manutenção de Sistemas Metroferroviários, que foram grandes parceiros durante esse processo de doutoramento.

Por fim, ao apoio concedido a mim pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de financiamento 001.

“A mente que se abre uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

## Resumo

Ao longo das últimas décadas, o aumento do tráfego, elevação da velocidade operacional e da exigência de maior carga por eixo tornaram o contato entre rodas e trilhos mais severos, levando a um aumento do desgaste desses componentes. Assim, compreender os mecanismos de desgaste e as transições que ocorrem em aços para rodas é de grande importância para os operadores ferroviários. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da temperatura e escorregamento no comportamento tribológico de um aço de roda classe C. Para isso foi utilizado um sistema de controle de temperatura que foi acoplado ao tribômetro disco-contra-disco, permitindo o controle da temperatura independentemente do nível de escorregamento adotado no ensaio. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e a 60 °C para os níveis de escorregamento de 1, 3 e 5%. Os resultados mostraram que o escorregamento governa o regime de desgaste da roda. Outras grandezas também foram influenciadas pelo escorregamento, como coeficiente de atrito, camada deformada, oxidação superficial e dureza do disco Roda, todas se elevando com o aumento do escorregamento. Uma competição entre desgaste e Fadiga Contato de Rolamento (FCR) também foi observada, com predominância da FCR para baixo escorregamento e desgaste para maiores escorregamentos, o que refletiu no comportamento das trincas de FCR, que reduziram em quantidade com o aumento do escorregamento. Todos esses resultados foram mais bem compreendidos com os resultados de tensão residual dos discos Roda após o ensaio disco-contra-disco, com a reversão das tensões compressivas para trativas na superfície dos discos. A realização de ensaios com a temperatura de 60 °C, simulando as condições mais próximas das reais das ferrovias brasileiras, mostraram que essa variável precisa ser levada em consideração ao avaliar o desgaste dos componentes ferroviários, pois foi observado que a temperatura reduziu a taxa de desgaste da roda e do trilho quando esses estão em um regime de desgaste severo, identificado neste trabalho com 3 e 5% de escorregamento. Esses resultados foram alcançados pelo maior encruamento, redução da tensão residual, menores trincas de fadiga de contato, mudança na oxidação superficial e de mecanismo de desgaste que atuaram de maneira sinérgica reduzindo a taxa de desgaste dos materiais. O coeficiente de atrito e a camada deformada não foram impactados pelo aumento da temperatura.

Palavras chave: Desgaste. Fadiga de contato de rolamento. Roda ferroviária. Temperatura.

## Abstract

Over the past few decades, increasing traffic, operational speed, and greater load demands per axle have made the contact between wheels and rails more severe, leading to an increase in wear of these components. Therefore, understanding the wear mechanisms and transitions that occur in wheel steels is of great importance to railway operators. This work aims to evaluate the effect of temperature and slip on the tribological behavior of a class C wheel steel. For this purpose, a temperature control system was coupled to a twin disc machine, allowing the temperature to be controlled independently of the slip level adopted in the test. The tests were performed at room temperature and at 60 °C for slip levels of 1, 3, and 5%. The results showed that slip governs the wheel wear regime. Other parameters were also influenced by slip, such as friction coefficient, deformed layer, surface oxidation, and wheel disc hardness, all of which increased with increasing slip. A competition between wear and rolling contact fatigue (RCF) was also observed, with predominance of RCF for low slip and wear for higher slips, which was reflected in the behavior of RCF cracks, which decreased in quantity with increasing slip. All these results were better understood with the residual stress results of the wheel discs after the twin disc test, with the reversal of compressive stresses to tensile stresses on the surface of the discs. Tests performed at a temperature of 60°C, simulating the conditions closest to those of Brazilian railways, showed that this variable needs to be taken into account when evaluating the wear of railway components, as it was observed that temperature reduced the wear rate of the wheel and rail when they are in a severe wear regime, identified in this work with 3 and 5% slip. These results were achieved by greater work hardening, reduction of residual stress, smaller rolling contact fatigue cracks, change in surface oxidation, and wear mechanism that acted synergistically to reduce the wear rate of the materials. The friction coefficient and deformed layer were not impacted by the increase in temperature.

Keywords: Wear. Rolling contact fatigue. Railway wheel. Temperature.

## Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Trabalhos concluídos pelo grupo de pesquisa de tribologia da FEM/Unicamp. Fonte: Autor.....	25
Figura 2.1 – Ilustração de uma roda ferroviária em corte e suas principais partes. Fonte: Autor.....	27
Figura 2.2 - Regiões do contato roda/trilho. Fonte: Adaptado de Lewis e Olofsson (2009). .....	31
Figura 2.3 - Diagrama de sistema de interfaces roda/trilho. Fonte: Adaptado de Lewis e Olofsson (2009). .....	32
Figura 2.4- Em (a) representação do contato entre dois corpos esféricos. Em (b) a área de contato gerado pelo contato desses corpos. Fonte: Adaptado de Lewis <i>et al.</i> (2017). .....	33
Figura 2.5 - Em (a) representação esquemática do contato entre dois cilindros. Em (b) a área de contato gerado pelo contato. Adaptado de Lewis <i>et al.</i> (2017). .....	35
Figura 2.6- Diagrama esquemático da distribuição de temperatura (isotérmicas) em torno do contato deslizante. Fonte: (BHUSHAN, 2000) .....	37
Figura 2.7- Efeito do escorregamento na temperatura dos discos em ensaios disco-contra-disco. Fonte: Autor. ....	39
Figura 2.8- Efeito Shakedown. Fonte: Adaptado de Bhushan (2000). ....	40
Figura 2.9- Diagrama de Shakedown. Fonte: Adaptado de Eadie <i>et al.</i> (2008). .....	41
Figura 2.10 - Regimes de desgaste para roda ferroviária. Adaptado de Lewis e Dwyer-Joyce (2004). .....	43
Figura 2.11 - Curva de Carter para diferentes condições. Fonte: Adaptado de Gallardo-Hernandez e Lewis (2008). .....	44
Figura 2.12- Efeito da temperatura na transição do regime severo para catastrófico. Fonte: Adaptado de Gallardo-Hernandez e Lewis (2008). .....	45
Figura 2.13 - Representação esquemática das diferentes configurações construtivas do tribômetro disco-contra-disco encontradas na literatura. Fonte: Autor. ....	48
Figura 2.14- Etapas metodológicas adotadas na análise bibliométrica. Fonte: Autor. ....	49
Figura 2.15 - Distribuição das publicações dos artigos por tema e ano. Fonte: Autor. ....	54
Figura 2.16 - Países que desenvolvem pesquisas com o uso do tribômetro disco-contra-disco na área ferroviária e conexões com formação de redes de pesquisa. Fonte: Autor. ....	55

Figura 2.17- Simulação no ensaio disco-contra-disco do efeito das condições ambientais no contato roda/trilho. Fonte: Autor. ....	57
Figura 2.18- Correlação de parâmetros operacionais de campos com os utilizados no ensaio disco-contra-disco e a faixa dos valores utilizados nos ensaios da categoria. Fonte: Autor. ...	60
Figura 3.1- Fluxograma metodológico adotado nesta tese. Fonte: Autor. ....	66
Figura 3.2 - Microestrutura do aço de roda classe C utilizado nesta tese (imagem obtida por MEV, com ataque químico com Nital a 2%). Fonte: Autor. ....	68
Figura 3.3 - Representação esquemática do equipamento disco-contra-disco. Fonte: Autor. ....	69
Figura 3.4- Sistema de aquecimento acoplado ao tribômetro disco-contra-disco. Em (A) a câmara de aquecimento utilizando uma lâmpada infravermelho e em (B) o sensor que faz a medição da superfície do disco Roda durante os ensaios no tribômetro. Fonte: Autor. ....	70
Figura 3.5 - Em (a), desenho esquemático de uma roda ferroviário. Em (b), apresenta-se a região de retirada dos discos no aro da roda. Fonte: Autor. ....	71
Figura 3.6- Desenho esquemático com as dimensões dos discos utilizados no ensaio disco-contra-disco. Fonte: Adaptado de Rezende (2020). ....	72
Figura 3.7 – Evolução da temperatura do ensaio em função do número de ciclos. Fonte: Autor. ....	74
Figura 3.8- Componentes do equipamento PRISM. Em (01) caixa com fonte de laser, (02) o sistema pneumático, (03) cabeçote de vídeo, (04) cabeçote de iluminação, (05) furadeira pneumática, (06) jato de ar comprimido e em (07) porta amostra. Fonte Autor. ....	76
Figura 3.9 - Etapas para realização do ensaio de tensão residual. Fonte: Autor. ....	77
Figura 3.10 - Regiões analisadas nas amostras após o ensaio disco-contra-disco foram a região radial e a região transversal. Fonte: Autor. ....	78
Figura 3.11- Características analisadas das trincas durante o estudo do comportamento da FCR. Fonte: Autor. ....	79
Figura 3.12- Microdurômetro instrumentado Anton Paar disponível no CPID. Fonte: Autor. ....	80
Figura 4.1 - Curva de coeficiente de atrito ao longo do ensaio para as condições com 1,3 e 5% de escorregamento realizados à temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	83
Figura 4.2- Coeficiente de atrito global em função do escorregamento para os ensaios realizados a temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	84
Figura 4.3 – Comparativo da curva de COT em função do escorregamento com os trabalhos de Zhu e colaboradores (2018) e Gallardo-Hernandez e colaboradores (2006). Fonte: Autor. ....	84

Figura 4.4 – Comparação da curva de COT em função da velocidade de escorregamento com os trabalhos de Rodriguez-Arana e colaboradores (2022), Zhu e colaboradores (2018) e Gallardo-Hernandez e colaboradores (2006). Fonte: Autor. ....	85
Figura 4.5 - Efeito do escorregamento no aumento de temperatura do ensaio disco-contra-disco para as condições com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor. ....	86
Figura 4.6 - Comparação do efeito do escorregamento na temperatura do ensaio para os experimentos realizados na temperatura ambiente deste trabalho com os trabalhos de Zhu e colaboradores (2018), Galardo-Hernandez e colaboradores (2006) e Lewis, Dwyer – Joyce (2004). Fonte: Autor. ....	87
Figura 4.7 - Perda de massa em função do escorregamento para os ensaios à temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	88
Figura 4.8 - Perda de massa total em função de $T\gamma/A$ para os ensaios realizados na temperatura ambiente deste trabalho comparado como perda de massa em ensaio realizado por Shu e colaboradores (2022) utilizando aços de roda perlítico CL65 e o trabalho de Ma e colaboradores (2016) que utilizaram o aço ER8. Fonte: Autor. ....	90
Figura 4.9 - Distribuição da tensão residual em função da profundidade dos discos Roda antes de realizar o ensaio disco-contra-disco. $\sigma_x$ = tensão residual na direção da pista de rolamento, $\sigma_y$ = tensão perpendicular a pista de rolamento, $\tau_{xy}$ = tensão de cisalhamento entre os planos xy. Fonte: Autor. ....	91
Figura 4.10 - Distribuição da tensão residual medida em diferentes profundidades em relação à pista de rolamento dos discos Roda e Trilho antes de realizar o ensaio disco-contra-disco. Fonte: Autor. ....	92
Figura 4.11 - Tensão residual para os discos Roda, em diferentes profundidades, após os ensaios realizados à temperatura ambiente com 1,3 e 5% de escorregamentos. Fonte: Autor. ....	93
Figura 4.12 - Linearidade da tensão residual com o escorregamento observados em diferentes profundidades dos discos Roda para os ensaios conduzidos a temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	94
Figura 4.13 - Relação entre tensão de cisalhamento máxima e tensão residual mensurada a 25 $\mu\text{m}$ da superfície do disco Roda. Fonte: Autor. ....	97
Figura 4.14 - Tensão residual para os discos Trilho após os ensaios realizados à temperatura ambiente com 1,3 e 5% de escorregamentos. Fonte: Autor. ....	98
Figura 4.15 - Efeito da tensão de cisalhamento na tensão residual dos discos Trilho a 25 $\mu\text{m}$ da superfície. Fonte: Autor. ....	99

Figura 4.16 – Comparativo entre a tensão residual do disco Roda e disco Trilho mensurada a 25 $\mu\text{m}$ da superfície. Fonte: Autor.....	100
Figura 4.17 – Dinâmica do contato do disco Roda e disco Trilho em condição de escorregamento com rolamento. N.F = atuação da força normal, T.F = atuação força tangencial e as tensões trativas são representadas por “+” enquanto as tensões compressivas são retratadas por “-”. Adaptado de Garnham; Beynon (1992).....	101
Figura 4.18 - Espectros Raman para os discos Trilho para os ensaios realizados em temperatura ambiente com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.....	103
Figura 4.19 - Espectros Raman para os discos Roda para os ensaios realizados em temperatura ambiente com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.....	105
Figura 4.20 - Características superficiais dos discos Trilho observada em microscopia estereoscópica. Em (a) condição de ensaio E1%amb, em (b) E3%amb e em (c) E5%amb. (Imagem obtida por microscopia estereoscópica, sem ataque químico). Fonte: Autor.....	107
Figura 4.21 - Características superficiais dos discos Roda observada em microscopia estereoscópica. Em (a) condição de ensaio E1%amb, em (b) E3%amb e em (c) E5%amb. (Imagem obtida por microscopia estereoscópica, sem ataque químico). Fonte: Autor.....	107
Figura 4.22 – Micrografias obtidas por MEV dos discos Trilho (A) e (B) e para os discos Roda (C) e (D) para os ensaios E1% Amb (Imagem sem ataque químico). Fonte: Autor.....	109
Figura 4.23 - Em (A) imagem durante o ensaio na condição E5% Amb com câmera lenta. Em (B) superfície do disco que representa o trilho, MEV. Em (C) superfície do disco que representa a roda, MEV (imagem MEV, sem ataque químico). Fonte: Autor.....	110
Figura 4.24 - Influência do escorregamento na profundidade da camada deformada para os ensaios realizados à temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	111
Figura 4.25 - Camada deformada, ataque com Nital M.O. Em (A) Disco Trilho E1% Amb, (B) Disco Trilho E5% Amb, (C) Disco Roda E1% Amb, e em (D) Disco Roda E5% Amb (imagem em M.O, ataque químico com Nital 2%). Fonte: Autor.....	112
Figura 4.26 - Perfil de dureza dos discos Trilho para os ensaios realizados à temperatura ambiente (imagem obtida por M.O, ataque químico com Nital 2%). Fonte: Autor.....	114
Figura 4.27 - Perfil de dureza dos discos Roda para os ensaios realizados à temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	115
Figura 4.28 - Comparação da dureza a 40 $\mu\text{m}$ da superfície entre os discos Roda e Trilho em diferentes escorregamentos. Fonte: Autor. ....	116
Figura 4.29 - Características das trincas de fadiga. Em (A) disco Trilho e em (B) disco Roda (imagem obtida por M.O, sem ataque químico). Fonte: Autor. ....	117

Figura 4.30 - Histograma com o comportamento do comprimento de trinca para os discos que representam a roda e o trilho no ensaio E1% Amb. Fonte: Autor. ....	118
Figura 4.31 - Elementos de um <i>boxplot</i> . Fonte: Autor. ....	120
Figura 4.32 - Comprimento de trinca disco Trilho com a presença dos outliers para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamentos realizados em temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	121
Figura 4.33 - Comprimento de trinca disco Trilho sem a presença dos <i>outliers</i> para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamentos realizados em temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	122
Figura 4.34 - Profundidade de trinca do disco Trilho para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamentos realizados em temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	123
Figura 4.35 - Comprimento de trinca disco Roda para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamentos realizados em temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	123
Figura 4.36 - Profundidade das trincas disco Roda para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamentos realizados em temperatura ambiente. Fonte: Autor. ....	124
Figura 4.37 - Densidade de trincas para os discos Trilho e os discos Roda para os ensaios conduzidos à temperatura ambiente com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor. ....	125
Figura 4.38 - Processo de geração de debris do disco Roda no ensaio E1% Amb (imagem obtida por M.O, sem ataque químico). Fonte: Autor. ....	126
Figura 4.39 - Formação dos debris para aços de rodas com microestrutura ferrita - perlita. Fonte: Adaptado de Ding <i>et al.</i> (2016). ....	126
Figura 4.40 - Efeito do escorregamento no comportamento tribológico do disco Roda para ensaios realizados sem controle de temperatura. Fonte: Autor. ....	127
Figura 4.41 - Efeito do escorregamento no comportamento tribológico do disco Trilho para ensaios realizados sem controle de temperatura. Fonte: Autor. ....	128
Figura 4.42 - Curva de coeficiente de atrito ao longo do ensaio para condições com 1, 3 e 5% de escorregamento realizados a 60 °C. Fonte: Autor. ....	130
Figura 4.43 - Curva de Carter para os ensaios realizados à temperatura ambiente e para os ensaios conduzidos a 60 °C. Fonte: Autor. ....	131
Figura 4.44 - Perda de massa em função do escorregamento para os ensaios realizados a 60 °C. Fonte: Autor. ....	132
Figura 4.45 - Taxa de desgaste em função de $T\gamma/A$ evidenciando os regimes de desgastes presentes nos ensaios realizados à temperatura ambiente e a 60 °C. Fonte: Autor. ....	133

Figura 4.46 - Comparativo efeito da temperatura na tensão residual para os discos Trilho e Roda nos ensaios realizados com 1,3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.....	135
Figura 4.47 - Efeito da temperatura na tensão residual de cisalhamento e na tensão residual para os discos Roda observados a 25 $\mu$ m da superfície. Fonte: Autor. ....	136
Figura 4.48 - Espectros Raman para os discos Trilho para os ensaios realizados a 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor. ....	137
Figura 4.49 - Espectros Raman para os discos Roda para os ensaios realizados a temperatura de 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor. ....	138
Figura 4.50 - Características superficiais dos discos Trilho. Em (a) condição de ensaio E1%60°C, em (b) E3%60°C e em (c) E5%60°C (imagem obtida por microscopia estereoscópica, sem ataque químico). Fonte: Autor. ....	139
Figura 4.51 - Características superficiais dos discos de roda observada em microscopia estereoscópica. Em (a) condição de ensaio E1%60°C, em (b) E3%60°C e em (c) E5%60°C (imagem em microscopia estereoscópica, sem ataque químico). Fonte: Autor. ....	140
Figura 4.52 - Comparativo da camada de óxido formada na superfície do disco Roda. (A) E5% Amb (B) E5%60°C (imagem em microscopia estereoscópica, sem ataque químico). Fonte: Autor.....	140
Figura 4.53 - Características dos danos superficiais para o disco Roda. Em (A) dos ensaios E5% Amb e em (B) dos ensaios E5%60°C (imagens obtidas por MEV, sem ataque químico). Fonte: Autor.....	141
Figura 4.54- Características dos danos superficiais para o disco do trilho. Em (A) dos ensaios E5% Amb e em (B) dos ensaios E5%60°C (imagens obtidas por MEV, sem ataque químico). Fonte: Autor. ....	142
Figura 4.55- Influência do escorregamento da camada deformada para os ensaios realizados a 60 °C. Fonte: Autor.....	143
Figura 4.56 - Camada deformada, ataque com Nital M.O. Em (A) Disco do trilho E1%60, (B) Disco Trilho E5%60, (C) Disco Roda E1%60, e em (D) Disco Roda E5%60 (imagem em M.O, ataque Nital 2%, aumento 200X). Fonte: Autor. ....	144
Figura 4.57 - Perfil de dureza dos discos Trilhos para os ensaios realizados a 60 °C. Fonte: Autor.....	145
Figura 4.58 - Perfil de dureza dos discos Roda para os ensaios realizados a 60 °C. Fonte: Autor.....	145
Figura 4.59 - Comparativo efeito da temperatura no perfil de dureza. Curvas em azul para ensaios realizados a frio e curva em laranja para ensaios realizados a 60 °C. Fonte: Autor. .	146

Figura 4.60 – Efeito da relação de dureza trilho/roda após o ensaio disco-contra-disco na perda de massa para os ensaios realizados à temperatura ambiente e a 60 °C nos escorregamento de 1, 3 e 5%. Fonte: Autor.....	147
Figura 4.61- Comprimento das trincas dos discos Trilho para os ensaios realizados a 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.....	148
Figura 4.62 - Efeito da temperatura no comprimento das trincas de FCR nos discos Trilho. Fonte: Autor.....	149
Figura 4.63 - Profundidade das trincas dos discos Trilho para os ensaios realizados a 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.....	150
Figura 4.64 – Comprimento das trincas dos discos Roda para os ensaios realizados a 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.....	151
Figura 4.65- Profundidade das trincas dos discos Roda para os ensaios realizados a 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.....	152
Figura 4.66 - Densidade de trincas para os discos Trilho e para os discos Roda para os ensaios conduzidos a 60 °C. Fonte: Autor.....	152
Figura 4.67 - Efeito da temperatura na perda de massa, camada deformada e COT para o disco Roda em função de diferentes escorregamentos . Fonte: Autor. ....	153
Figura 4.68 - Efeito da temperatura na perda de massa, camada deformada e COT para o disco Trilho em função de diferentes escorregamentos. Fonte: Autor. ....	154
Figura 4.69 - Resumo dos principais mecanismos de desgaste atuantes. Fonte: Autor....	155

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Classes de rodas ferroviárias segundo a AARM M107.....	27
Tabela 2.2 - Estudos com as principais microestruturas formadas na fabricação de rodas e trilhos.....	29
Tabela 2.3 - Equações de Hertz para o caso de contato esfera contra esfera.....	34
Tabela 2.4 - Equações de Hertz para o caso de contato cilindro contra cilindro.....	35
Tabela 2.5 - Classificação dos artigos levantados na revisão sistemática. ....	52
Tabela 2.6 - Principais análises realizada após ensaio disco-contra-disco para caracterizar os aços empregados em rodas e trilhos.....	62
Tabela 2.7 - Correlação de parâmetros operacionais de campos com os utilizados no ensaio disco-contra-disco e a faixa dos valores utilizados nos ensaios da categoria.....	64
Tabela 2.8 - Principais técnicas empregadas para avaliação de tensão residual de componentes ferroviários. ....	65
Tabela 3.1- Composição química do aço estudado (% massa).....	67
Tabela 3.2- Nomenclatura adotada para cada condição de ensaio na disco-contra-disco. .	75
Tabela 4.1 - Equação que correlaciona tensão residual com escorregamento (ESC).....	95
Tabela 4.2 - Posições das Bandas Raman para os produtos de corrosão comumente apresentados para os aços. ....	104
Tabela 4.3 - Valor p-value para os testes de Shapiro-Wilk. ....	119

## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	21
1.1	Objetivo Geral .....	23
1.2	Objetivo específicos .....	23
1.3	Contextualização da tese dentro do grupo de pesquisa de tribologia da FEM/Unicamp. ....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	26
2.1	RODAS FERROVIÁRIAS .....	26
2.1.1	Aços utilizados na fabricação de rodas e trilhos.....	28
2.2	CONTATO RODA/TRILHO .....	30
2.3	MECÂNICA DO CONTATO RODA/TRILHO.....	32
2.3.1	Hertz aplicado ao contato roda/trilho.....	33
2.4	TEMPERATURA NO CONTATO.....	36
2.4.1	Temperatura em rodas e trilhos .....	38
2.5	FADIGA DE CONTATO.....	40
2.6	DESGASTE.....	42
2.6.1	Regimes de desgaste .....	42
2.6.2	Mecanismo de desgaste .....	45
2.7	ENSAIO DISCO-CONTRA-DISCO .....	46
2.7.1	Estudos recentes sobre o uso do tribômetro disco-contradisco para simular as condições ferroviárias.....	49
2.7.2	Simulação das condições ambientais na ferrovia.....	56
2.7.3	Simulação das condições operacionais na ferrovia.....	57
2.7.4	Principais técnicas empregadas para caracterizar o material após o ensaio disco-contradisco .....	60
2.8	ÓXIDOS NO CONTATO RODA/TRILHO .....	63
2.9	TENSÕES RESIDUAIS NO CONTATO RODA/TRILHO.....	64
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	66

3.1	RESUMO METODOLÓGICO .....	66
3.2	MATERIAL DE ESTUDO .....	67
3.2.1	Composição química.....	67
3.2.2	Caracterização microestrutural .....	67
3.3	ENSAIOS DISCO-CONTRA-DISCO .....	69
3.3.1	Equipamento .....	69
3.3.2	Corpos de provas .....	71
3.3.3	Análises antes do ensaio .....	72
3.3.4	Condição de ensaio .....	74
3.4	TENSÃO RESIDUAL.....	76
3.5	CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL E SUBSUPERFICIAL.....	78
3.6	PERFIL DE DUREZA .....	80
3.7	ESPECTOMETRIA RAMAN.....	81
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	82
4.1	EFEITO DO ESCORREGAMENTO NAS CARACTERÍSTICAS TRIBOLÓGICAS DO AÇO CLASSE C PARA OS ENSAIOS REALIZADOS À TEMPERATURA AMBIENTE.....	82
4.1.1	COEFICIENTE DE ATRITO.....	82
4.1.2	EFEITO DO ESCORREGAMENTO NO AUMENTO DE TEMPERATURA 86	
4.1.3	TAXA DE DESGASTE.....	88
4.1.4	TENSÃO RESIDUAL .....	91
4.1.5	ANÁLISE SUPERFICIAL DOS DISCOS .....	102
4.1.6	ANÁLISE SUBSUPERFICIAL DOS DISCOS .....	111
4.1.7	Caracterização das trincas de fadiga de contato .....	117
4.1.8	RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS .....	127
4.2	EFEITO DO ESCORREGAMENTO NAS CONDIÇÕES TROBILÓGICAS NOS ENSAIOS REALIZADOS A 60 °C.....	130

4.2.1	COEFICIENTE DE ATRITO.....	130
4.2.2	TAXA DE DESGASTE.....	132
4.2.3	Tensão residual .....	134
4.2.4	Análise superficial dos discos.....	136
4.2.5	Caracterização subsuperficial .....	143
4.2.6	Caracterização das trincas de fadiga de contato .....	148
4.2.7	RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS .....	153
5	CONCLUSÕES .....	156
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	157
7	PUBLICAÇÕES .....	158
8	REFERÊNCIAS.....	159

## 1 INTRODUÇÃO

A malha ferroviária brasileira é composta por 29.320 km, e, por essas vias, um volume de carga de 489 milhões de toneladas úteis foi transportado no ano de 2020, um aumento de 93% em relação a 1997, ano em que se iniciaram as concessões no Brasil. Desse total de carga levada, o transporte de carga pesada foi responsável por 72% do volume transportado em 2020 (ANTF, 2022).

Ainda analisando dados da Agência Nacional de Transporte Ferroviário, identifica-se que no ano de 2020 foram investidos R\$ 4,8 bilhões na frota de material rodante, possibilitando um expressivo crescimento destes ativos, chegando a 116 mil vagões disponíveis para operação no Brasil nesse mesmo ano (ANTF, 2022).

Um dos mais importantes componentes do vagão é a roda ferroviária, pois a interação desse componente com o trilho é responsável pela transferência de força que garante o movimento e a frenagem da composição (HARMON; LEWIS, 2016). Além disso, ela suporta o peso dos vagões e diversas solicitações mecânicas causadas durante a operação ferroviária.

Ao longo das últimas décadas, as demandas de aumento do tráfego, a elevação da velocidade operacional e a exigência de maior carga por eixo tornaram o contato entre rodas e trilhos mais severos, levando um aumento do desgaste desses componentes (CHEN *et al.*, 2016a; HE *et al.*, 2016). A severidade desse contato tem provocado um aumento significativo com os custos de manutenção dos vagões. Em um estudo recente, sobre custo de ciclo de vida de roda ferroviária, foi apontado que as rodas representam um custo de 37,2% do custo de materiais na manutenção de vagões e 13,16% do custo total (FRACALOSSO, 2017).

Dessa maneira, compreender os mecanismos de desgaste e transições que ocorrem em aço para rodas é de grande importância para os operadores ferroviários. Diversos trabalhos já foram conduzidos buscando compreender e identificar os regimes de desgaste das rodas ferroviárias. Bolton e Clayton (1984) e Lewis e Dwyer-Joice (2004) identificaram a presença de três regimes de desgaste: moderado, severo e catastrófico. Esses regimes foram bem caracterizados em termos de taxa de desgaste, análise superficial e caracterizações de debris (BOLTON; CLAYTON, 1984; LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004).

A mudança entre o regime moderado e severo está associada à mudança de deslizamento parcial na interface do contato para condições de deslizamento total (LEWIS; DWYER-

JOYCE, 2004; ZHOU *et al.*, 2021). Isso torna a relação de escorregamento um dos principais fatores que afetam o mecanismo de contato da interface roda/trilho (HU *et al.*, 2020a; STOCK; PIPPAN, 2011). Assim sendo, os estudos que avaliam o comportamento tribológico das rodas e trilhos direcionam-se em compreender como o escorregamento entre a roda e o trilho influencia na formação dos danos desses componentes ferroviários (MA *et al.*, 2016; MAKINO; KATO; HIRAKAWA, 2012; ZHANG *et al.*, 2022; ZHOU *et al.*, 2021).

Entretanto, devido à natureza aberta desse complexo tribossistema, diversos fatores externos ao contato roda/trilho podem atuar de maneira sinérgica e promover mudanças no comportamento tribológico das rodas (LEWIS; OLOFSSON, 2009). Desse modo, surge a necessidade de compreender como os fatores externos também podem influenciar no comportamento tribológico desse tribossistema. Estudos já foram conduzidos para avaliar influência das condições operacionais das ferrovias, como escorregamento, carga por eixo e velocidade. (CHEN *et al.*, 2016a; WANG *et al.*, 2017a; ZHOU *et al.*, 2016). O efeito de terceiro corpo também foi estudado, avaliando-se a influência do uso de modificadores de atrito, lubrificantes e intensificadores de atrito (ARIAS-CUEVAS; LI; LEWIS, 2011; WANG *et al.*, 2011a, 2014a). Assim como a Influência das condições ambientais foi considerada, como o efeito da chuva (NAKAHARA *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2011b, 2013), da areia do deserto (WHITE; LEWIS, 2019), a presença de folhas características do outono europeu (ISHIZAKA *et al.*, 2020), aumento da umidade relativa do ar e também simulações envolvendo baixa temperaturas (SHI *et al.*, 2018; ZHOU *et al.*, 2022).

Embora tenham sido apresentados alguns trabalhos que se dedicaram a estudar o efeito das condições operacionais e ambientais no comportamento tribológico das rodas ferroviárias, observa-se ainda uma lacuna na literatura para estudos que avaliam o impacto da temperatura, principalmente em valores mais próximos aos das condições reais de operação no Brasil. Estudos recentes mostraram que as altas temperaturas características na estação de verão das regiões sudestes e nordestes do Brasil têm efeito no aquecimento dos componentes ferroviários. Em um estudo na estrada de ferro Vitória Minas, observou-se que a temperatura média dos trilhos podem chegar a temperatura de 61 °C (CASSARO, 2017).

Não menos importantes, o traçado da via e as condições operacionais da ferrovia impactam significativamente no aumento de temperaturas das rodas. Costa e Freitas (2015) ressaltam o efeito do tempo e tipo de aplicação de freio, da carga sobre roda e da velocidade de operação como variáveis que conduzem à elevação de temperatura das rodas. No estudo dos autores em uma malha ferroviária brasileira, identificou-se que as temperaturas médias das rodas variavam

entre 45 e 105 °C ao longo do trajeto, sendo que. Em outro estudo desenvolvido por um operador ferroviário brasileiro, a medida da temperatura das rodas foi aferida ao longo de 800 km, sendo observada uma variação de temperatura entre 50 e 95 °C (VALE, 2017).

Nesse viés, fica evidenciada a importância de se aplicarem técnicas que permitam compreender o efeito da temperatura no comportamento tribológico nos componentes ferroviários. Nessa perspectiva, um ensaio muito empregado para simular o contato roda/trilho é o ensaio disco-contra-disco (BRAGHIN; BRUNI; LEWIS, 2009). Entretanto, a temperatura nos ensaios normalmente não é controlada (ZHU, 2017) e, sim, é função das variáveis de ensaios, principalmente escorregamento (GALLARDO-HERNANDEZ; LEWIS; DWYER-JOYCE, 2006; LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004; ZHU *et al.*, 2018).

Neste trabalho, utilizou-se um sistema de controle de temperatura, recentemente desenvolvido pelo grupo de tribologia da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, que foi acoplado ao tribômetro disco-contra-disco. Esse projeto incremental permitiu o controle da temperatura independentemente do nível de escorregamento adotado no ensaio, possibilitando, dessa maneira, tornar a temperatura uma variável controlada. Com isso, será possível responder o seguinte questionamento: Qual o efeito da temperatura e escorregamento no comportamento tribológico de um aço de roda classe C? Diante disso, listam-se, a seguir, o objetivo geral e específicos deste trabalho.

## 1.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da temperatura e do escorregamento no comportamento tribológico de um aço de roda classe C utilizando um tribômetro disco-contra-disco.

## 1.2 Objetivo específicos

- Analisar o efeito de escorregamentos de 1, 3 e 5% no coeficiente de atrito, na temperatura ao longo do ensaio, na perda de massa, nos regimes e mecanismos de desgaste, na formação de óxidos, nas tensões residuais superficiais, no perfil de dureza e na formação de trincas nos dois discos, em ensaio a seco, na temperatura ambiente;

- Verificar o efeito de escorregamentos de 1, 3 e 5% no coeficiente de atrito, na perda de massa, nos regimes e mecanismos de desgaste, na formação de óxidos, nas tensões residuais superficiais, no perfil de dureza e na formação de trincas nos dois discos, em ensaio a seco, realizados a 60 °C;
- Averiguar o efeito da temperatura no coeficiente de atrito, na perda de massa, nos regimes e mecanismos de desgaste, na formação de óxidos, nas tensões residuais superficiais, no perfil de dureza e na formação de trincas nos dois discos.

### 1.3 Contextualização da tese dentro do grupo de pesquisa de tribologia da FEM/Unicamp.

As pesquisas acerca da área ferroviária desenvolvidas pelo grupo de pesquisa de tribologia da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, coordenado pelo Prof. Dr. Paulo Roberto Mei, iniciaram-se em 2008, por meio do convênio com a empresa MWL Brasil, Rodas e Eixos Ltda. No primeiro momento, a atuação do grupo foi direcionada ao estudo de desenvolvimento de aços de rodas ferroviárias com maior resistência ao desgaste. Os resultados foram apresentados em duas teses de doutorado (Cunha, 2013; Fonseca, 2015) e três dissertações de mestrado (Cunha, 2009; Villas Boas, 2010; Finamor, 2015).

Na segunda fase da parceria entre o grupo de pesquisa de tribologia da Unicamp e a empresa MWL, juntamente com o do LFS (Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da USP), a partir de 2013, foi desenvolvido o tribômetro disco-contra-disco, um importante equipamento utilizado pelas operadoras ferroviárias e comunidade acadêmica nos estudos na área ferroviária. O equipamento desenvolvido possui privilégio de inovação, protegido pelo depósito da patente N° BR1020170275914.

Com o desenvolvimento do equipamento e o convênio firmado em 2017 com o Instituto Tecnológico da Vale (ITV) dentro do projeto Cátedra Roda-Trilho, novas linhas de pesquisas foram surgindo. A primeira delas foi avaliar o comportamento tribológico de aços de roda classe C e classe D (Amorim, 2018; Rezende, 2020; Miranda, 2021). Uma linha de pesquisa destinada ao gerenciamento de atrito também foi iniciada, com trabalhos já defendidos na avaliação de graxas e modificadores de atrito aplicados na área ferroviária (Xavier, 2022; Carvalho, 2022). Na Figura 1.1, é apresentado todo o histórico de trabalhos desenvolvidos pelo grupo com aplicações na área ferroviária.

<b>2022</b>	<b>M</b>	Efeito do espessante e da viscosidade de graxas na resistência ao desgaste em ensaio disco-contra-disco. Ana Cecília de Carvalho.
	<b>M</b>	Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação de modificadores de atrito em ensaios disco-contra-disco. Yanna Luccidi Xavier.
<b>2021</b>	<b>M</b>	Influência da microestrutura perlítica na fadiga de contato por rolamento e deslizamento de rodas ferroviárias. Rodrigo da Silva Miranda.
<b>2020</b>	<b>D</b>	Comparação da resistência ao desgaste entre as microestruturas perlíticas e bainíticas obtidas de uma mesma roda ferroviária. Andrei Bavaresco Rezende.
	<b>D</b>	Desenvolvimento de Aço Microligado ao Nióbio com Microestrutura Perlítica Bainítica para Rodas Ferroviárias Forjadas Classe D. Domingos José Minicucci.
<b>2018</b>	<b>M</b>	Análise do desgaste por rolamento com deslizamento em rodas ferroviárias microligadas com vanádio. Gabriel Araújo Amorim.
<b>2015</b>	<b>D</b>	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. Solange Tamara da Fonseca.
	<b>M</b>	Efeito da adição de nióbio e molibdênio na deformação plástica e na decomposição isotérmica da austenita em aços 0,7%C Felipe Pereira Finamor.
<b>2013</b>	<b>D</b>	Caracterização mecânica e microestrutural de aços médio carbono microligados ao nióbio e molibdênio. Adilto Pereira Andrade Cunha.
<b>2010</b>	<b>M</b>	Desenvolvimento de aços microligados de alto carbono para rodas ferroviárias. Renato Lyra Villas Bôas.
<b>2009</b>	<b>M</b>	Efeitos da adição de molibdênio e nióbio na microestrutura e propriedades mecânicas de aço 0,5 %C laminado a quente. Adilto Pereira Andrade Cunha.

Nota: **M** mestrado. **D** Doutorado.

Figura 1.1 – Trabalhos concluídos pelo grupo de pesquisa de tribologia da FEM/Unicamp. Fonte: Autor.

O presente trabalho inaugura uma nova linha de pesquisa do grupo, avaliando o efeito das condições ambientais e operacionais no comportamento tribológico de aços utilizados na fabricação de rodas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentadas as principais contribuições da literatura recente que serão norteadoras para embasar e confrontar os resultados desta pesquisa. Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica consultando as bases de dados científicos *Web Of Science e Scopus*, que são bases de relevância acadêmica na área de engenharia. De maneira concomitante, foram consultados relatórios internos de concessionárias ferroviárias, bem como anais de eventos científicos relacionados à área ferroviária, como o da conferência da *International Heavy Haul Association (IHHA)*.

### 2.1 RODAS FERROVIÁRIAS

As rodas ferroviárias têm um importante papel na eficiência do transporte ferroviário. Elas dispõem da função de direcionar a composição ferroviária nas curvas e manter a composição centralizada nas retas, suportam as altas cargas do trem, distribuindo-a sobre o trilho. Além disso, resistem às tensões térmicas provenientes do sistema de frenagem transmitido para roda pelo contato entre a sapata de freio na pista de rolamento (HARMON; LEWIS, 2016).

Diante dos avanços ocorridos no transporte ferroviário nas últimas décadas, principalmente levando-se em consideração o aumento da carga por eixo, a velocidade das composições e a alta competitividade do setor, as rodas ferroviárias passaram por uma série de modificações tanto em relação ao seu formato e sua composição química (CHEN *et al.*, 2016a; HE *et al.*, 2016).

As rodas ferroviárias são robustas, pesando até 450 kg e com diâmetro variando entre 840-1250 mm e apresentam forma complexa (ZENG *et al.*, 2016). Na Figura 2.1 é apresentado a nomenclatura das principais partes da roda.

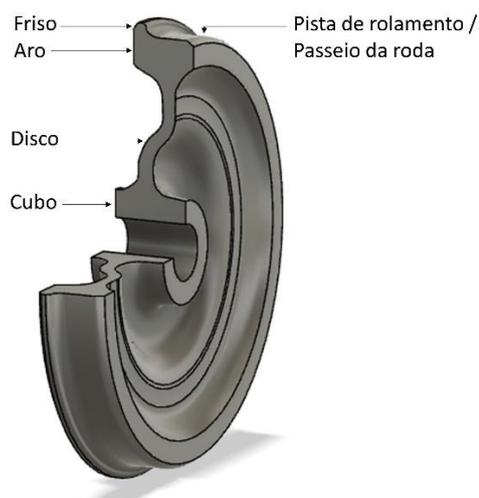


Figura 2.1 – Ilustração de uma roda ferroviária em corte e suas principais partes. Fonte: Autor.

A parte do aro requer maior resistência em relação ao disco, uma vez que os materiais próximos ao friso da roda estão sujeitos a cargas de contato severas. Portanto, durante o processo de fabricação, o aro é temperado para aumentar a resistência mecânica e introduzir tensão residual de compressão nos materiais (ZENG *et al.*, 2016). Todo processo de fabricação das rodas segue normas, como as da AAR (*Association of American Railroads*), UIC (*Union International Railways*) entre outras.

Quanto ao uso, a norma AAR M107 divide as rodas em classes de aplicação, conforme pode ser observado na Tabela 2.1. A diferença entre a roda classe C e D está no uso de elementos microligantes nas rodas classe D.

Tabela 2.1 - Classes de rodas ferroviárias segundo a AARM M107.

Classe	Dureza (HB)	Carbono (%massa)	Aplicação
L	197-277	<0,47	Alta velocidade com condições de frenagem severas e cargas leves.
A	255-321	0,47-0,57	Alta velocidade com condições de frenagem severas e cargas moderadas.
B	302-341	0,57-0,67	Alta velocidade com condições de frenagem severas e cargas elevadas.
C	321-363	0,67-0,77	Baixa velocidade com condições de frenagem moderadas e carga elevada.
D	341-415	0,67-0,77	Transporte de carga pesada, com cargas por eixo acima de 30 ton.

Fonte: Adaptado de (AAR, 2011).

### 2.1.1 Aços utilizados na fabricação de rodas e trilhos

Na última década, diversos estudos surgiram com intuito de buscar melhores propriedades em desgaste e FCR dos materiais já utilizados na fabricação de rodas e trilhos, bem como na busca de novos aços que atendam aos requisitos do mercado ferroviário.

A principal microestrutura utilizada na fabricação de rodas e trilhos tem sido a perlítica (LI; HUANG; HUANG, 2019; REZENDE *et al.*, 2020a). Ao longo dos anos tem-se buscado melhorar seu comportamento em desgaste e FCR, reduzindo seu espaçamento interlamelar, o tamanho das colônias de perlita, além de maior controle da quantidade de inclusões não metálicas (REZENDE *et al.*, 2020a; ZAPATA; JARAMILLO; TORO, 2011). A modificação da estrutura perlítica pode ser alcançada a partir de diferentes tratamentos térmicos, termomecânicos e pela introdução de elementos como nióbio, vanádio, entre outros (REZENDE *et al.*, 2020a).

Essas modificações elevam a dureza da estrutura e reduzem a quantidade de defeitos internos que influenciam a formação de trincas de FCR. O aumento da dureza e da resistência mecânica de estruturas perlíticas têm melhorado o comportamento em desgaste e FCR, porém há um limite para isso e parece ter-se alcançado ou estar próximo dessa fronteira. Desta forma, outras microestruturas como a bainita tem sido estudadas para oferecer alternativas para aumentar a dureza em trilhos (ZAPATA; JARAMILLO; TORO, 2011).

A estrutura bainítica proporciona aumento de dureza necessário para melhorar as propriedades de desgaste e uma excelente combinação de resistência e tenacidade (LI; HUANG; HUANG, 2019). Todavia, ainda não há consenso sobre seu comportamento em desgaste, o que pode estar relacionado ao uso de diferentes composições químicas, durezas, tipos e presença de outras microestruturas combinadas (REZENDE *et al.*, 2020a).

Por outro lado, aços com mais baixos teores de carbono também têm sido estudados principalmente para aplicações em trens de alta velocidade e para transporte ferroviário leve (LIU *et al.*, 2020a; SHI *et al.*, 2019b; SOLANO-ALVAREZ; FERNANDEZ GONZALEZ; BHADESHIA, 2019). Adicionalmente, os aços hipereutetoides também estão estudados, e isso ocorre, pois a resistência ao desgaste geralmente se relaciona à dureza do material. Dessa maneira, a busca por materiais mais duros também direciona estudos sobre essa classe de aços (ZHOU *et al.*, 2020).

A Tabela 2.2 apresenta alguns estudos comparativos desenvolvidos nos últimos anos, avaliando-se materiais utilizados na fabricação dos principais componentes ferroviários. Nesse sentido, fica clara a predominância de estudos com aços perlíticos e o uso desse material como parâmetro de comparação nos estudos com outros materiais. Isso ocorre dada a sua importância tecnológica e por ser ainda a microestrutura mais utilizada na fabricação de rodas e trilhos.

Tabela 2.2 - Estudos com as principais microestruturas formadas na fabricação de rodas e trilhos.

Perlíticos	Bainíticos	Hipo-eutetoides	Hiper-eutetoides	Autores
XXX				(SEO <i>et al.</i> , 2016)
XXX				(ZHU <i>et al.</i> , 2018)
XXX				(REZENDE <i>et al.</i> , 2019)
XXX				(CHRISTOFOROU; FLETCHER; LEWIS, 2019)
XXX				(SEO <i>et al.</i> , 2019a)
XXX	XXX			(REZENDE <i>et al.</i> , 2020a)
XXX	XXX			(ZAPATA; JARAMILLO; TORO, 2011)
XXX		XXX		(SHI <i>et al.</i> , 2019b)
XXX		XXX		(SOLANO-ALVAREZ; FERNANDEZ GONZALEZ; BHADESHIA, 2019)
XXX			XXX	(ZHOU <i>et al.</i> , 2020)

Fonte: Autor.

Entre os trabalhos que se dedicaram ao estudo da microestrutura perlítica, destacam-se alguns resultados, como os de Seo *et al.* (2016), que observaram melhoria da vida em fadiga de trilhos e atribuíram esse comportamento ao aumento da ductilidade e tenacidade a fratura do material. Além disso, Rezende e colaboradores (2019) observaram que a introdução de vanádio em aços perlíticos para rodas reduziu a perda de massa. Já Seo *et al.* (2019a) verificaram que o aumento de dureza em trilhos que foram tratados termicamente no boleto propiciou redução do desgaste, mas causou aumento da taxa de crescimento de trincas em consequência da redução da tenacidade a fratura.

Os estudos que tratam do comportamento de microestruturas bainíticas apresentaram menor perda de massa da bainita em relação à microestrutura perlítica quando a primeira apresentou maior dureza (REZENDE *et al.*, 2020a). Já Zapata *et al.* (2011) quando compararam estruturas bainítica e perlítica com mesma dureza para o par de ensaio encontraram perda de massa

semelhante. Li *et al.* (2019) pesquisaram o aço ER8 com duas estruturas diferentes. Uma composta por bainita superior, perlita e ferrita e a outra por apenas perlita e ferrita. O resultado da perda de massa foi maior para a estrutura que continha a bainita superior. Em outros trabalhos, foi comparado o comportamento de uma estrutura multifásica (bainita / martensita / austenita retida) com estrutura completamente bainítica. A microestrutura mista apresentou menor perda de massa que a bainítica pura (LI; HUANG; HUANG, 2019).

Solano-Alvarez *et al.* (2019) estudaram cinco aços para trilhos e observaram que o mesmo trilho de médio carbono quando vanádio era adicionado ao invés da realização de tratamento térmico proporcionou redução na taxa de desgaste de 2,3 vezes para a mesma dureza. Ademais, Liu *et al.* (2020) estudaram a utilização de um tratamento térmico no aço ER9 utilizado para a fabricação de rodas ferroviárias. A estrutura de ferrita e perlita, característica do material sem tratamento, resultou em perda de massa foi menor que na estrutura de sorbita oriunda do tratamento. Já Zhou *et al.* (2020) estudando o comportamento de um aço hipereutetoide sujeito a baixas temperaturas, comparou seu desempenho com o de dois aços eutetoides nas mesmas condições. O resultado demonstrou que, em baixas temperaturas o aço hipereutetoide apresentou menor perda de massa, mas maiores comprimentos de trinca.

## 2.2 CONTATO RODA/TRILHO

A eficiência do transporte ferroviário está relacionada com as interações que ocorrem no contato roda/trilho, que, mesmo sendo muito pequeno – na ordem de  $1 \text{ cm}^2$  –, é responsável pela transferência de força que garante a tração e a frenagem da composição (HARMON; LEWIS, 2016). O contato roda/trilho é uma interação complexa com atuação sinérgica de vários fatores. Segundo Lewis e Olofsson (2009), a complexidade é provocada pela natureza aberta do sistema, o que significa que muitas fontes podem afetar o seu comportamento (LEWIS; OLOFSSON, 2009). Os contaminantes presentes na via férrea, como folhas (ISHIZAKA *et al.*, 2020) e minério de ferro (WHITE; LEWIS, 2019), são os primeiros a influenciarem. As mudanças climáticas induzidas por chuva (NAKAHARA *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2011b, 2013) ou baixa temperatura (SHI *et al.*, 2018) também apresentam forte influência. Harmon e Lewis (2016) citam ainda a influência de condições operacionais como diferenças de peso por eixo da composição.

Soma-se ainda a influência do traçado da via, que provoca alterações das posições de contato roda/trilho, suas variações de tensões e seu escorregamento. Basicamente, existem duas posições de contato roda/trilho: o que ocorre entre o topo do boleto com o passeio da roda e aquele que ocorre entre a face do boleto e a flange da roda. Na Figura 2.2, observa-se como esse contato é influenciado pelo traçado da via férrea. Na Figura 2.2 (A), é ilustrada uma seção com curva à direita. Nessa situação, ocorre o contato entre a face do boleto com a flange da roda. Já em (B), observa-se um contato típico que ocorre em seção de reta de via, no qual a região de contato ocorre entre o topo do boleto com o passeio da roda.

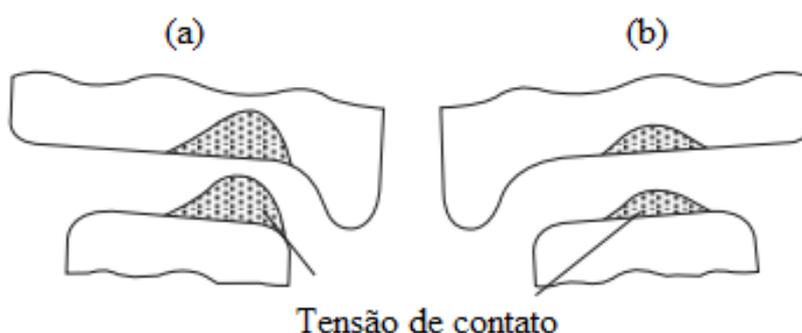


Figura 2.2 - Regiões do contato roda/trilho. Fonte: Adaptado de Lewis e Olofsson (2009).

Para garantir condições seguras para operação, em uma ferrovia de carga pesada, os coeficientes de atrito ideal para o contato topo de trilho com passeio da roda é de 0,3 a 0,5, enquanto que, para o contato face do boleto com flange da roda, é de 0,1. Manter o nível de contato em uma condição ótima significa garantir segurança para a via permanente, além de redução dos custos com manutenção da via permanente e prolongamento da vida útil das rodas. Assim, os operadores ferroviários buscam várias soluções para otimizar o sistema. Entretanto, qualquer ação nesse sentido precisa levar em consideração os diversos aspectos que estão correlacionados entre si de alguma forma, como ilustrado na Figura 2.3.

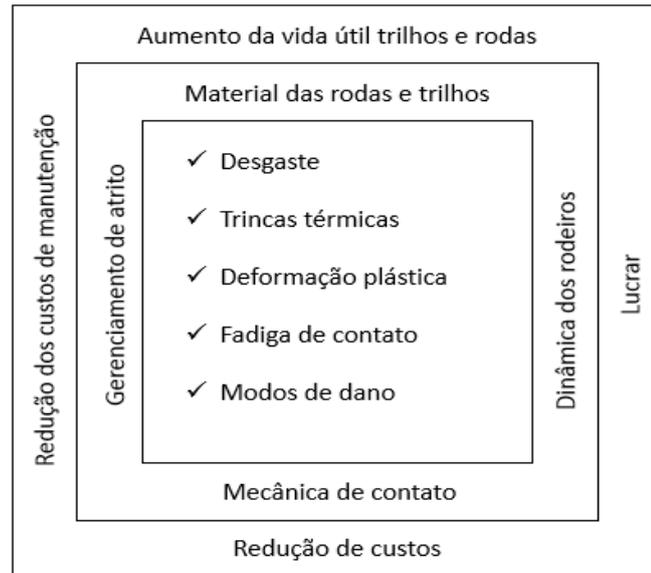


Figura 2.3 - Diagrama de sistema de interfaces roda/trilho. Fonte: Adaptado de Lewis e Olofsson (2009).

### 2.3 MECÂNICA DO CONTATO RODA/TRILHO

A mecânica do contato é uma área da tribologia que estuda as interações que ocorrem entre superfícies sólidas. Essa interação ou contato pode ocorrer em diferentes escalas. Os primeiros estudos surgiram com a publicação do físico alemão Heinrich Hertz, com o artigo sobre contatos elásticos em 1882. No seu trabalho, ele cita o problema do contato roda/trilho, e logo seus estudos ganharam relevância e aplicação na área ferroviária, servindo de base para pesquisadores naquela época, e sua teoria continua sendo aplicada até os dias atuais (LUNDÉN; PAULSSON, 2009). Os fundamentos científicos de nossas pesquisas atuais são fundamentados em Heinrich Hertz, Frederick William Carter e Hans Fromm (KNOTHE, 2008).

Nesta revisão, serão apresentadas as contribuições do trabalho de Hertz para o cálculo da tensão de contato entre as rodas e os trilhos. Essas tensões de contato são relevantes para os estudos na área ferroviária, pois ocorrem de maneira periódica na frequência de rotação das rodas. Com isso, elas levarão os componentes ferroviários à fadiga superficial (NORTON, 2013).

### 2.3.1 Hertz aplicado ao contato roda/trilho

Na teoria de Hertz, os corpos são considerados homogêneos com superfícies lisas e sem a presença de atrito. As superfícies dos corpos, ao se tocarem sob ação de uma carga normal, inicialmente estão em contato em um único ponto ou em uma linha dependendo da geometria dos corpos. Com o aumento da carga normal, os corpos se deformaram elasticamente ao redor do ponto de contato, formando uma área de contato com dimensões pequenas em relação ao tamanho dos corpos.

Os cálculos das tensões introduzidas nos materiais em contato são dependentes da geometria das superfícies em contato. No caso geral, é permitida qualquer geometria tridimensional em cada corpo em contato. Entretanto, para as aplicações nas simulações laboratoriais de contato roda/trilho a partir de ensaios disco-contra-disco, duas geometrias especiais são de interesse, a saber, esfera contra esfera e cilindro contra cilindro. Lewis e colaboradores (2017) apresentam as equações, originalmente deduzidas por Hertz em 1881, da área de contato, das pressões de contato e da distribuição da pressão de contato, de acordo com o formato do contato. No contato por rolamento de duas esferas, é gerada uma área de contato elíptica, conforme ilustrado Figura 2.4.

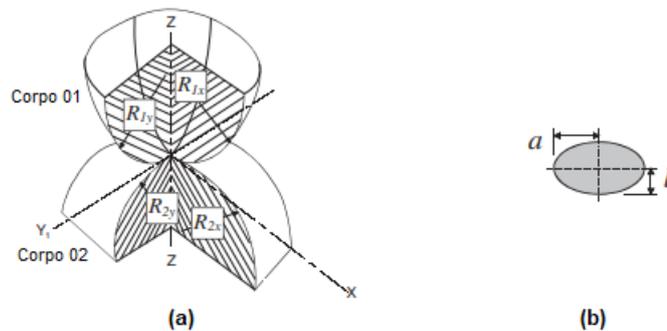


Figura 2.4- Em (a) representação do contato entre dois corpos esféricos. Em (b) a área de contato gerado pelo contato desses corpos. Fonte: Adaptado de Lewis *et al.* (2017).

Na Tabela 2.3, são apresentadas as equações que descrevem a dimensão da área de contato, a pressão de contato máximo, a pressão de contato médio e a distribuição de pressão para o contato entre duas superfícies esféricas.

Tabela 2.3 - Equações de Hertz para o caso de contato esfera contra esfera.

Raio reduzido	Dimensões da área de contato	Pressão de contato máxima	Pressão de contato média	Distribuição da pressão de contato
$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y}$ <p>Onde:</p> $\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{1x}} + \frac{1}{R_{2x}}$ <p>e</p> $\frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{1y}} + \frac{1}{R_{2y}}$	$a = \sqrt[3]{\frac{3k^2 E(k) P R'}{\pi E^*}}$ $b = \sqrt[3]{\frac{3E(k) P R'}{\pi k E^*}}$	$p_0 = \frac{3P}{2\pi ab}$	$p_{med} = \frac{P}{\pi ab}$	$p(x, y)$ $= p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$
<p>Onde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>k</math> é o parâmetro de elipticidade <math>k = a/b</math>;</li> <li>- <math>E(k)</math> é uma integral elíptica de segunda ordem. A resolução da integral elíptica pode ser obtida a partir de tabelas. Alternativamente, uma solução aproximada é dada por:</li> </ul> $k = 1,0339 \left( \frac{R_y}{R_x} \right)^{0,6360}$ $E = 1,0003 + \frac{0,5968 R_x}{R_y}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>E^*</math> é o módulo de elasticidade reduzido:</li> </ul> $\frac{1}{E^*} = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)$ <p>Sendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\nu_1</math> e <math>\nu_2</math> são os coeficientes de Poisson dos corpos 1 e 2;</li> <li><math>E_1</math> e <math>E_2</math> são os módulos de elasticidade dos corpos 1 e 2.</li> </ul>				

Fonte: Adaptado de Lewis *et al.* (2017).

Já no movimento de rolamento entre dois cilindros, sua área de contato de Hertz será um retângulo, conforme observado na Figura 2.5.

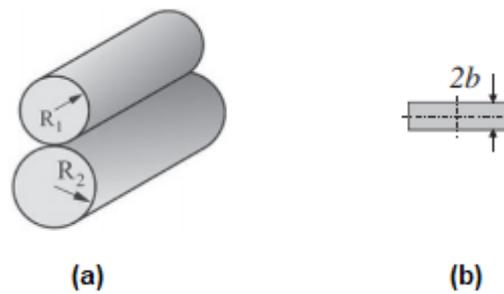


Figura 2.5 - Em (a) representação esquemática do contato entre dois cilindros. Em (b) a área de contato gerado pelo contato. Adaptado de Lewis *et al.* (2017).

Na Tabela 2.4, são apresentadas as equações que descrevem a dimensões da área de contato, a pressão de contato máxima, a pressão de contato médio e a distribuição de pressão de contato.

Tabela 2.4 - Equações de Hertz para o caso de contato cilindro contra cilindro.

Raio reduzido	Dimensões da área de contato	Pressão de contato máxima	Pressão de contato média	Distribuição da pressão de contato
$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	$b = \sqrt{\frac{4P'R'}{\pi E^*}}$	$p_0 = \frac{2P'}{b\pi}$	$p_{med} = \frac{P'}{2b}$	$p(x) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}}$
<p>Onde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- b é metade da largura do retângulo da área de contato (m);</li> <li>- P' é a carga por unidade de comprimento (N/m)</li> <li>- E* é o módulo de elasticidade reduzido:</li> </ul> $\frac{1}{E^*} = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)$ <p>Sendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\nu_1</math> e <math>\nu_2</math> são os coeficientes de Poisson dos corpos 1 e 2.</li> <li><math>E_1</math> e <math>E_2</math> são os módulos de elasticidade dos corpos 1 e 2.</li> </ul>				

Fonte: Adaptado de Lewis *et al.* (2017).

Nos ensaios disco-contra-disco, as pressões de contatos são calculadas obedecendo as equações apresentadas nas Tabela 2.3 e Tabela 2.4, dependendo da forma dos discos. Geralmente, são utilizados dois discos planos ou um disco plano e o outro com um raio de curvatura na superfície de contato. O segundo caso conduz a maiores pressões de contato, porém, a área de contato pode ser aumentada ao longo do ensaio reduzindo a pressão (LEWIS *et al.*, 2017). Na literatura, a grande maioria dos trabalhos são conduzidos utilizando discos com raio na superfície.

## 2.4 TEMPERATURA NO CONTATO

Quando dois corpos estão em movimento relativo ocasionado pelo escorregamento puro ou escorregamento com rolamento entre eles, ocorrerá o atrito, que pode existir por diferentes mecanismos dentro da área real de contato. Por meio desse processo de fricção, a energia mecânica é transformada em energia interna ou calor, o que faz com que a temperatura dos corpos aumente quando eles estão em movimento relativo. O mecanismo exato pelo qual esta transformação de energia ocorre pode variar de uma situação para outra, e a localização desta transformação está concentrada na área real de contato entre dois corpos em movimento relativo (BHUSHAN, 2000).

Dois mecanismos são aceitos para o aquecimento das superfícies. O primeiro baseia-se no fato de que a maior parcela da dissipação de energia ocorre devido às interações em escala atômica entre as várias camadas atômicas nas superfícies de contato. No que se refere ao segundo mecanismo, a maior parte da energia dissipada ocorre na região abaixo do contato por processos de deformação plástica. No trabalho de Fisher e colaboradores (2003), os autores equacionaram a parcela de aquecimento proveniente do atrito e da deformação plástica para o contato da roda/trilho (FISCHER; DAVES; WERNER, 2003). Embora não haja consenso sobre o mecanismo predominante na transformação de energia, a maioria dos tribologistas concordam que quase toda a energia dissipada em contatos friccionais é transformada em calor, e assume-se que toda a energia de atrito é dissipada como calor, que é conduzido nos corpos de contato na interface de contato real (BHUSHAN, 2000).

A temperatura possui papel fundamental na transição de mecanismo de desgaste. Desse modo, conhecer a temperatura do contato é fundamental para manter seu tribossistema controlado. No contato entre os corpos, três níveis de temperaturas são conhecidos, e eles

ocorrem em condições geométricas e temporais diferentes (Figura 2.6). A temperatura mais alta ocorre a nível do contato de uma aspereza e é da ordem de  $10\mu\text{m}$  de diâmetro. Essa temperatura pode chegar até a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  para contatos com deslizamento severos e dura apenas o tempo no qual as asperezas permanecem em contato, tempo normalmente inferior a  $10\mu\text{s}$ . Devido à característica de curta duração, ela é denominada de temperatura instantânea, conhecida no idioma inglês como temperatura *flash* ( $T_f$ ). O segundo nível de temperatura está relacionado à média integrada no espaço e no tempo das temperaturas de todas as asperezas que se encontram dentro da área de contato. Ela é denominada de temperatura de contato nominal ( $T_{nom}$ ). À medida que afastamos na região da área do contato, a temperatura dos corpos diminui consideravelmente. Esta temperatura, localizada a milímetros da região do contato, é denominada de temperatura de corpo ( $T_{co}$ ).

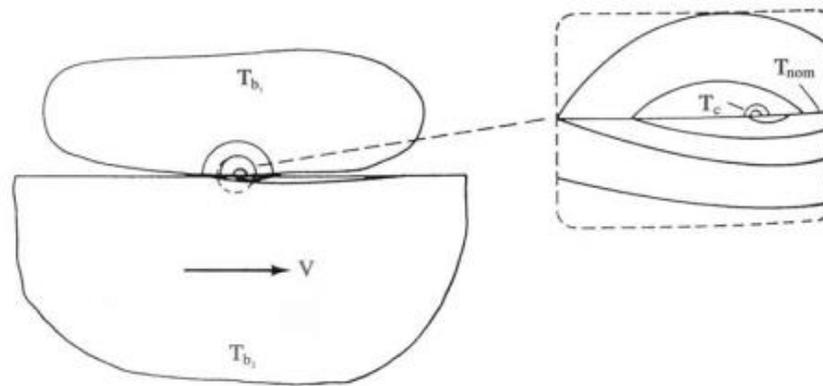


Figura 2.6- Diagrama esquemático da distribuição de temperatura (isotérmicas) em torno do contato deslizante. Fonte: (BHUSHAN, 2000)

Conhecendo os três níveis de temperatura de um contato, pode-se definir a temperatura do contato ( $T_c$ ) como contribuição dos três níveis de temperatura. Assim, tem-se a equação 2.1:

$$T_c = T_f + T_{nom} + T_{co} \quad (\text{eq. 2.1})$$

Stachowiak e Batchelor (2006) relatam a importância de se conhecerem as temperaturas do contato, uma vez que elas podem afetar o regime de lubrificação e taxas de desgaste através da formação de óxidos, produção de camadas superficiais transformadas metalurgicamente, alteração de geometria local causada por efeitos de expansão térmica ou mesmo fusão superficial. Os autores propõem como equação para o cálculo da temperatura do contato apenas

em função da temperatura do corpo em contato mais a fração de temperatura referente à temperatura *flash* (eq. 2.2).

$$T_c = T_f + T_{co} \quad (\text{eq. 2.2})$$

Para os ensaios disco-contra-disco, poucos são os estudos que calculam as temperaturas de contato, com a exceção dos trabalhos publicados por Lewis e Dwyer-Joyce (2004) e por Gallardo-Hernandez, Lewis e Dwyer-Joyce (2006) que seguiram uma abordagem muito parecida da proposta Stachowiak e Batchelor (2006). Neste trabalho, as temperaturas abordadas nos ensaios são as relacionadas à temperatura do corpo.

#### 2.4.1 Temperatura em rodas e trilhos

Durante a operação ferroviária, diversos fatores atuam no tribossistema de maneira que alteram a temperatura das rodas, trilhos e a temperatura do contato roda/trilho. A primeira fonte de calor refere-se ao atrito gerado pela velocidade relativa entre a roda e o trilho. Essa fonte de calor pode ser modelada analiticamente pela equação 2.3.

$$Q = \mu \cdot N \cdot v \quad (\text{eq. 2.3})$$

Onde a quantidade de calor gerado pelo atrito ( $Q$ ) é função do coeficiente de atrito ( $\mu$ ), da carga normal ( $N$ ) e da velocidade de deslizamento ( $v$ ). Com as atuais condições de via que operam com curvas com raios pequenos, altas velocidades e peso por eixo, nota-se um aumento nas temperaturas das rodas ao longo dos últimos anos. Nos ensaios disco-contra-disco que simulam as condições de contato do sistema roda/trilho é observado um efeito de elevação da temperatura conforme se aumenta o escorregamento. Na Figura 2.7, é apresentado o efeito do escorregamento no aumento da temperatura durante o ensaio disco-contra-disco (GALLARDO-HERNANDEZ; LEWIS; DWYER-JOYCE, 2006; LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004; ZHU *et al.*, 2018). Na figura, pode-se perceber um aumento linear da temperatura em função do escorregamento.

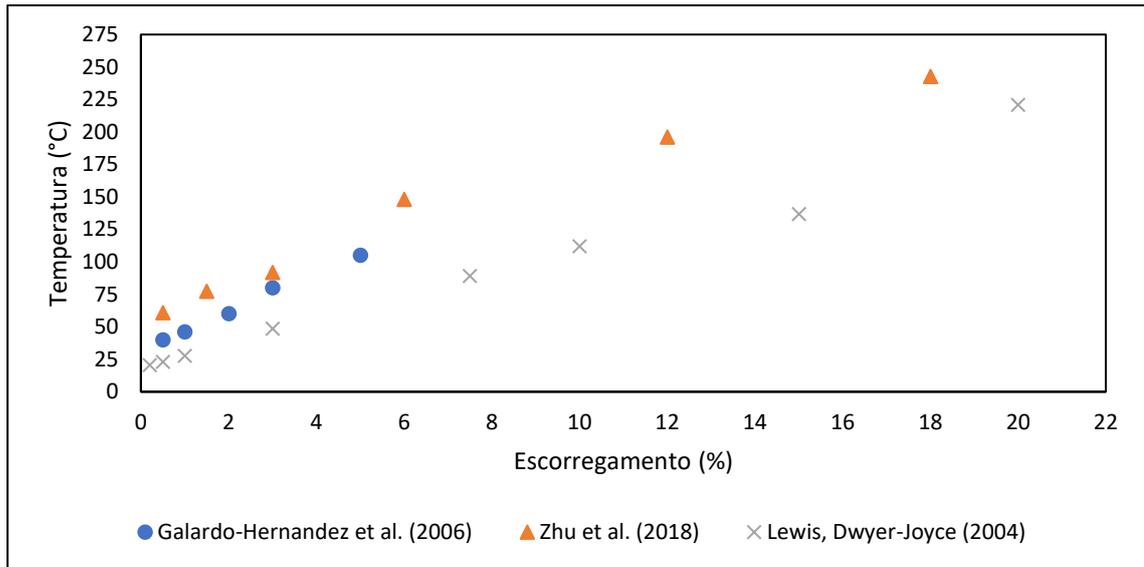


Figura 2.7- Efeito do escorregamento na temperatura dos discos em ensaios disco-contra-disco. Fonte: Autor.

O efeito da temperatura no traçado da via e as condições operacionais da ferrovia no Brasil já foram avaliadas por Costa e Freitas (2015). Os autores identificaram que a carga sobre roda, velocidade de operação e traçado da via influenciavam no aquecimento das rodas. No estudo dos autores em uma malha ferroviária brasileira, eles identificaram que as temperaturas médias das rodas variavam entre 45-105 °C ao longo do trajeto. Em outro estudo, desenvolvido por um operador ferroviário brasileiro, a medida da temperatura das rodas foi aferida ao longo de 800 km e observado uma variação de temperatura entre 50 e 95 °C (VALE, 2017).

A segunda fonte de calor ocorre durante o período de frenagem. Nos trens de cargas, a ação de frenagem da roda é realizada pressionando o(s) bloco(s) de freio contra a pista de rolamento da roda. Assim a energia cinética do trem em movimento é transformada em calor, que é dividido entre blocos e roda (VERNERSSON, 2007).

Soma-se ainda as condições ambientais sob as quais a ferrovia está instalada, que podem influenciar a temperatura no contato roda/trilho. Na China a ferrovia de trem de alto velocidade de Harbin-Dalian opera com temperaturas muito baixas no nordeste do país, podendo atingir a mínima de (-36,5 °C). Nesse sentido, Shi e colaboradores (2018) avaliaram o efeito das baixas temperaturas nas características de adesão do contato roda/trilho (SHI *et al.*, 2018). No Brasil, as altas temperaturas características na estação de verão principalmente das regiões sudestes e nordestes impactam na temperatura dos componentes ferroviários. Em um estudo na estrada de ferro Vitória - Minas, observou-se que a temperatura média dos trilhos podem chegar a temperatura de 61 °C (CASSARO, 2017).

## 2.5 FADIGA DE CONTATO

A fadiga é um processo no qual pequenas trincas em um componente mecânico crescem gradativamente pelo efeito de um carregamento cíclico, levando, muitas vezes, a ruptura do material a uma tensão menor que a tensão limite de escoamento. Nesse fenômeno, uma distinção merece atenção: a fadiga convencional para a fadiga de contato por rolamento (FCR). A primeira ocorre quando as tensões cíclicas são aplicadas e distribuídas em uma grande área, normalmente sob ação de dobramento ou torção. Já a FCR ocorre em estados de tensões hertziana, ou seja, as tensões de contato são causadas por uma força que é normal ao plano de contato, e esse contato restrito a uma área muito pequena (GLAESER; SHAFFER, 1996).

No sistema roda/trilho a fadiga de contato por rolamento pode levar os componentes ferroviários a uma série de respostas. Na Figura 2.8 é possível ver as respostas em função de diferentes solicitações cíclicas.

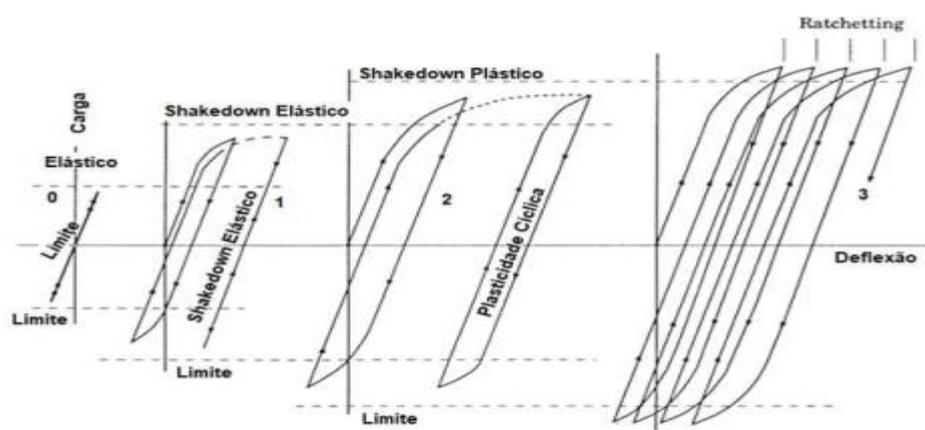


Figura 2.8- Efeito Shakedown. Fonte: Adaptado de Bhushan (2000).

Para baixas solicitações, todas as deformações decorrentes do contato roda/trilho são elásticas. Para as regiões entre o limite elástico e plástico o primeiro carregamento provocará uma deformação plástica, entretanto, para os demais carregamentos, as deformações serão elásticas. Dessa forma, nas duas situações o material estará seguro de FCR (EADIE, *et al*, 2008). Agora, uma vez ultrapassado o limite plástico na superfície e subsuperfície do material, dois fenômenos podem ocorrer e esses são influenciados pelo coeficiente de atrito do sistema. Para baixos coeficientes de atrito, a tensão de cisalhamento máxima estará localizada na subsuperfície do material então uma propagação de trinca subsuperficial é o mais provável, no

entanto, com o aumento do coeficiente de atrito, maior que 0,3, a tensão de cisalhamento máxima estará na superfície e o *ratchetting* acontecerá, conforme Figura 2.9 (EKBERG, 2009).

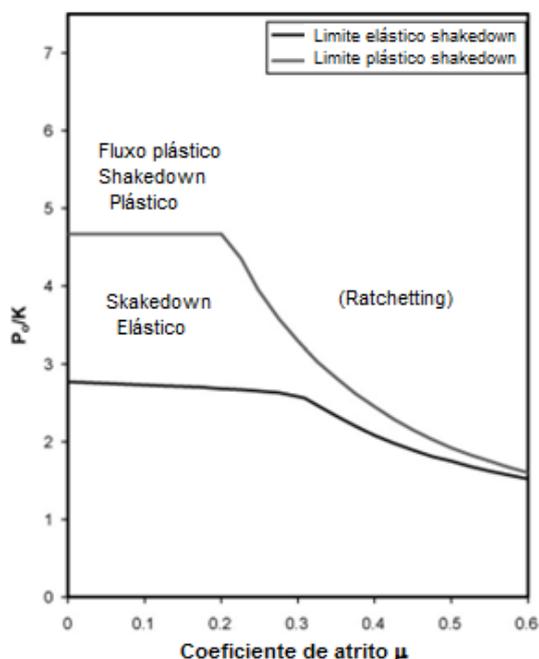


Figura 2.9- Diagrama de Shakedown. Fonte: Adaptado de Eadie *et al.* (2008).

Nesse sentido, três abordagens podem ser realizadas para manter o sistema seguro da FCR. As duas primeiras estão relacionadas com a redução do efeito do eixo Y no sistema. Nesse modo, pode-se reduzir o valor P, que corresponde à máxima pressão, na distribuição de Hertz, ou pode-se aumentar o valor de K, que representa o limite de resistência ao cisalhamento do material. A última abordagem tange à redução do coeficiente de atrito do sistema. Considerando isso, os esforços dos pesquisadores atualmente destinam-se em atuar nessas três linhas.

Shevtsov, Markine e Esveld (2008) desenvolveram um projeto de perfil de roda ferroviária levando-se em conta a fadiga de contato e o desgaste. Com um ponto de contato duplo eles observaram um maior desgaste, entretanto, em virtude das menores tensões de contato, o risco de FCR foi reduzido.

Já Stock e Pippin em 2011 realizaram estudos do efeito da microestrutura presente e composição química dos trilhos na formação da FCR, a partir do qual observaram que aços com maior dureza apresentam maior resistência ao início de FCR.

Stock *et al.* (2011) avaliaram o efeito do uso de modificadores de atrito na FCR. Na pesquisa em laboratório utilizando ensaio disco-contra-disco, os autores observaram uma redução na

formação de trincas nos conjuntos roda/trilhos testados com modificadores de atrito (STOCK; PIPPAN, 2011).

## 2.6 DESGASTE

### 2.6.1 Regimes de desgaste

Ao longo da década de 1980 houve significativas contribuições para o entendimento dos regimes de desgaste que podem ocorrer no sistema roda/trilho. Um importante trabalho foi desenvolvido por Bolton e Clayton (1984), que identificaram, pela primeira vez, três regimes de desgaste para o sistema roda/trilho utilizando um ensaio disco-contra-disco. Os regimes foram denominados na época de regime I, regime II e regime III (BOLTON; CLAYTON, 1984). Todavia, os mecanismos de desgaste que governam estes regimes e suas transições só foram mais satisfatoriamente compreendidos com o trabalho de Lewis e Dwyer-Joyce (2004).

Lewis e Dwyer Joyce (2004) identificaram a presença dos regimes moderado, severo e catastrófico, estudando o aço para roda R8T, em ensaios duplo disco. Esses regimes foram caracterizados em termos de taxa de desgaste, aparência da superfície de contato com os discos, análise metalográfica e características de debris. Na Figura 2.10, é possível identificar as transições entre os regimes.

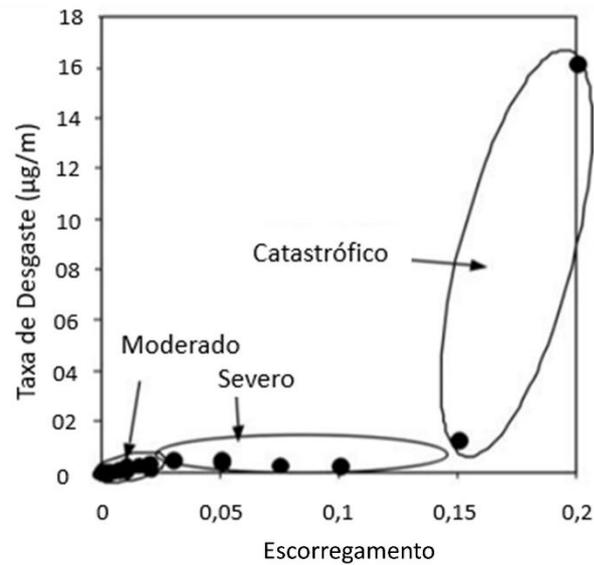


Figura 2.10 - Regimes de desgaste para roda ferroviária. Adaptado de Lewis e Dwyer-Joyce (2004).

A primeira transição de regime, de moderado para severo, ocorre por conta da mudança de deslizamento parcial para deslizamento total no contato. No ensaio disco-contra-disco, à medida que escorregamento aumenta, ocorre uma alteração nas características do contato, reduzindo-se a região de adesão e aumentando a região de deslizamento no contato. Esse comportamento elevará a distribuição de tração no contato, proporcionando maiores tensões de cisalhamento na superfície e, conseqüentemente, o desgaste de material. Essa condição se estenderá até o momento que só existir tração no contato, então o coeficiente de atrito estará saturado e ocorrerá uma estabilização no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste, caracterizando o término da transição de regime (CARTER, 1926). Gallardo-Hernandez e Lewis (2008) apresentam o ponto de saturação do COT para diversas situações, que se observa na Figura 2.11.

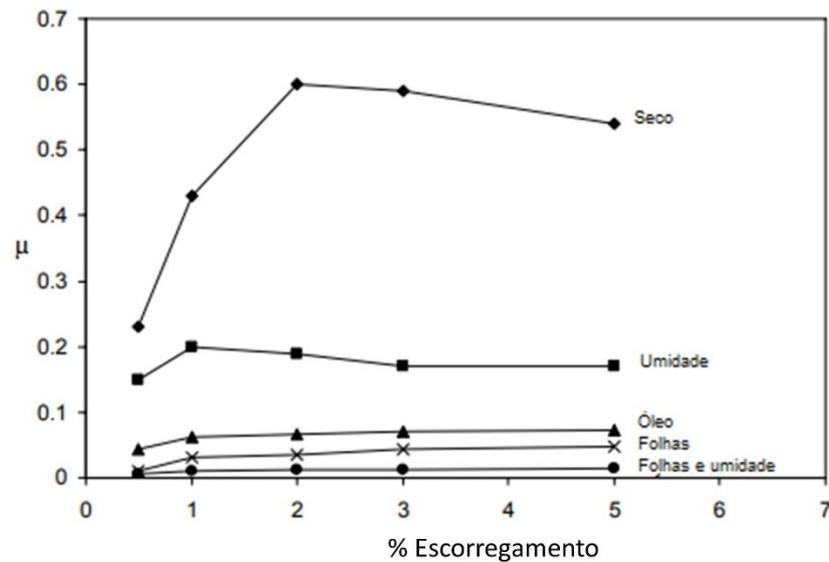


Figura 2.11 - Curva de Carter para diferentes condições. Fonte: Adaptado de Gallardo-Hernandez e Lewis (2008).

No regime severo, o aumento do escorregamento não provocará mais impacto na taxa desgaste do material, que permanecerá constante. Entretanto, com o aumento progressivo do escorregamento, ocorrerá um aumento da temperatura dos discos. Tal aumento de temperatura será responsável pela transição de regime severo para catastrófico, pois induzirá uma redução na resistência ao escoamento e outras propriedades do material. Lewis e Dwyer-Joyce (2004) identificaram no tribossistema estudado (1500 MPa, 400 RPM e 15%) que a temperatura dos discos chegou entre 200 a 250 °C, ocorrendo a transição para o regime catastrófico neste momento, conforme observado na Figura 2.12.

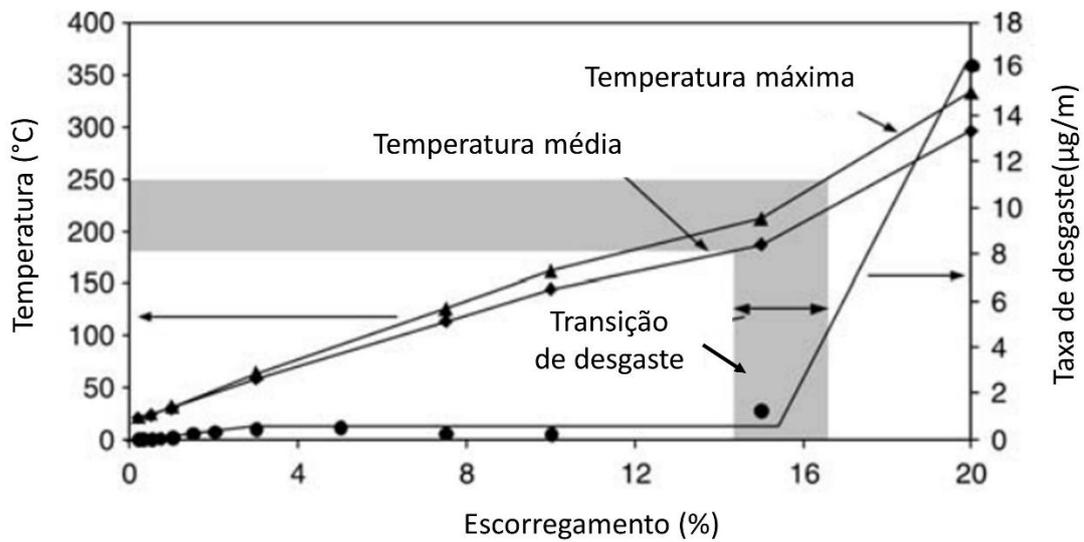


Figura 2.12- Efeito da temperatura na transição do regime severo para catastrófico. Fonte: Adaptado de Gallardo-Hernandez e Lewis (2008).

## 2.6.2 Mecanismo de desgaste

### 2.6.2.1 Desgaste oxidativo

Em função das características do tribossistema formado pela roda e trilho como temperatura de contato e a presença de umidade, diferentes óxidos podem ser formados na superfície do material. O desgaste oxidativo ocorre quando essa camada de óxido formada cresce e atinge um tamanho crítico e é destacada do material pela ação do atrito. Uma vez removida, o metal será exposto ao ambiente do tribossistema e uma nova camada será formada dando continuidade ao processo de desgaste do material.

No ensaio disco-contra-disco, tal mecanismo, geralmente, pode ser identificado em uma análise visual, buscando a presença de uma coloração marrom nos discos. Em análises mais detalhadas, com caracterizações microestruturais, podem ser identificadas evidências de rompimento de camada de óxido da superfície. Outras características identificadas nesse mecanismo é a presença de uma superfície com baixa rugosidade, frequentemente menor do que a inicial e os debrís muitos pequenos, na ordem de 100 nm (LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004; LEWIS; OLOFSSON, 2009).

### 2.6.2.2 Desgaste por *Ratcheting*

No regime severo, o mecanismo de desgaste é alterado para *ratcheting*, ocorrendo a exaustão da ductilidade do material, seguido pelo crescimento de trinca e destacamento de material (delaminação). A superfície gerada neste mecanismo é áspera e normalmente apresenta rugosidade maior do que a original. Os debrís são metálicos e apresentam tamanho de até 0,01 mm (LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004; LEWIS; OLOFSSON, 2009).

Esse mecanismo de desgaste é comumente encontrado na literatura, em especial para situações com baixo escorregamento entre roda/trilho (FANTECELLE STREY *et al.*, 2021; MA *et al.*, 2016; MIRANDA *et al.*, 2022; REZENDE *et al.*, 2020a; WANG *et al.*, 2017a; ZHOU *et al.*, 2016).

### 2.6.2.3 Desgaste adesivo

As altas pressões do contato combinadas com as asperezas existente nas superfícies do trilho e roda, causam uma deformação plástica nas asperezas, gerando um contato íntimo e juntas entre as superfícies. Assim, quando houver um movimento relativo entre as superfícies, acontecerá o rompimento dessas junções, promovendo a transferência de material de uma superfície para a outra, caracterizando o desgaste adesivo (SOLEIMANI; MOAVENIAN, 2017).

A tendência de se formarem ligações adesivas depende das propriedades químicas e físicas dos materiais envolvidos, tipo e quantidade de carga e propriedades superficiais como rugosidade (SOLEIMANI; MOAVENIAN, 2017).

## 2.7 ENSAIO DISCO-CONTRA-DISCO

O uso do ensaio disco-contra-disco para avaliar superfícies que experimentam fadiga de contato não é recente. Em 1922, Alfred J. Asmler desenvolveu o primeiro e o mais popular equipamento, conhecido atualmente como máquina de teste Asmler. Em 1935, Merritt desenvolveu um tribômetro com características similares, que foi utilizado para simular o

contato dos dentes de engrenagens helicoidais e avaliar o seu desempenho (MERRITT, 1935). O teste com o disco-contra-disco consiste em colocar dois discos para girar em contato com a ação de uma força radial externa. Durante o ensaio, é possível controlar três variáveis: o escorregamento entre os discos através da diferença de velocidade entre eles, a pressão de contato através da aplicação da força externa e a velocidade de rotação.

Na literatura, observam-se diferentes configurações construtivas do equipamento sendo projetado e desenvolvido ao longo dos últimos anos (FLETCHER; BEYNON, 2000; MENEGHETTI; TERRIN; GIACOMETTI, 2016; MODER *et al.*, 2017). Na configuração mais comum do equipamento, são utilizados dois motores independentes, o que permite realizar o ensaio com diferentes velocidades e qualquer relação de deslizamento entre os discos, controlando-se a velocidade dos motores de maneira independente, proporcionando, desse modo, maior liberdade metodológica (FLETCHER; BEYNON, 2000). Alguns equipamentos utilizam apenas um motor e a relação de deslizamento entre os discos é obtida por sistema de engrenagem (RAMALHO, 2015). Uma desvantagem desse sistema é que as possibilidades de variação de deslizamento são restritas às relações de transmissão entre as engrenagens. Outra possibilidade para gerar o deslizamento entre os discos é a utilização de discos com tamanhos diferentes (BOLTON; CLAYTON, 1984), mas não é muito usual atualmente, visto que não permite um controle do deslizamento ao longo do ensaio.

No que se refere à aplicação da carga, os sistemas mais utilizados são os pneumáticos ou hidráulicos, com vantagens para tribômetro que utilizam sistemas pneumáticos, pois esses atuadores permitem aplicação de cargas mais elevadas e uniformes ao longo de todo o ensaio (HARMON *et al.*, 2018; REZENDE, 2020; SANTA *et al.*, 2019). A utilização de um sistema mais simples e barato também é identificado na literatura com equipamentos que utilizam um sistema com compressão de molas em um dos eixos da máquina para promover a aplicação da carga (ZHAO *et al.*, 2018). Na Figura 2.13, é exibida uma representação esquemática dos diferentes sistemas de controle de escorregamento e aplicação de carga encontrados nos tribômetros disco-contra-disco na literatura.

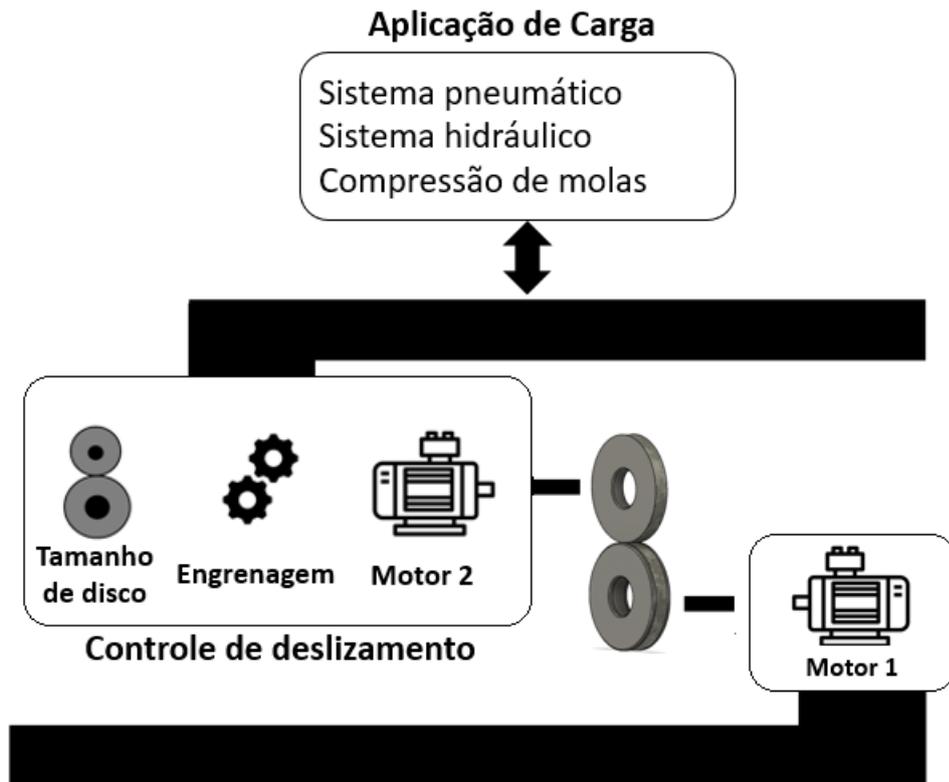


Figura 2.13 - Representação esquemática das diferentes configurações construtivas do tribômetro disco-contra-disco encontradas na literatura. Fonte: Autor.

Atualmente, a aplicação do tribômetro disco-contra-disco se estende a avaliação de diversos componentes que operam sob condição combinada de rolamento com escorregamento e altas tensões de contato hertzianas. Podem-se citar rolamentos de máquinas (GALLARDO; LEWIS, 2009), cilindros de laminação (MERCADO-SOLIS *et al.*, 2007), engrenagens (LIU *et al.*, 2020d) e componentes ferroviários. Na área ferroviária, esse ensaio é muito utilizado, pois os parâmetros de ensaios são facilmente relacionados com condições operacionais de uma ferrovia, permitindo simular a influência de carga por eixo a partir da pressão de contato (CHEN *et al.*, 2016a), contatos em diferentes regiões da roda, alterando-se o escorregamento (WANG *et al.*, 2017a; ZHOU *et al.*, 2016), ou, ainda, a velocidade da composição controlando-se a velocidade de rotação dos discos de ensaio (HE *et al.*, 2016; LEE; NAMGUNG; KWON, 2018).

### 2.7.1 Estudos recentes sobre o uso do tribômetro disco-contra-disco para simular as condições ferroviárias

Para o levantamento dos estudos recentes utilizando o tribômetro disco-contra-disco na área ferroviária foi realizada uma extensa revisão bibliográfica sistemática. Para a realização dessa análise, foi adotada a metodologia proposta por Tranfield *et al.* (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003). Na metodologia, a revisão sistemática foi dividida em identificação da pesquisa, seleção dos estudos, avaliação da qualidade, extração e síntese de dados. As etapas metodológicas são apresentadas na Figura 2.14.

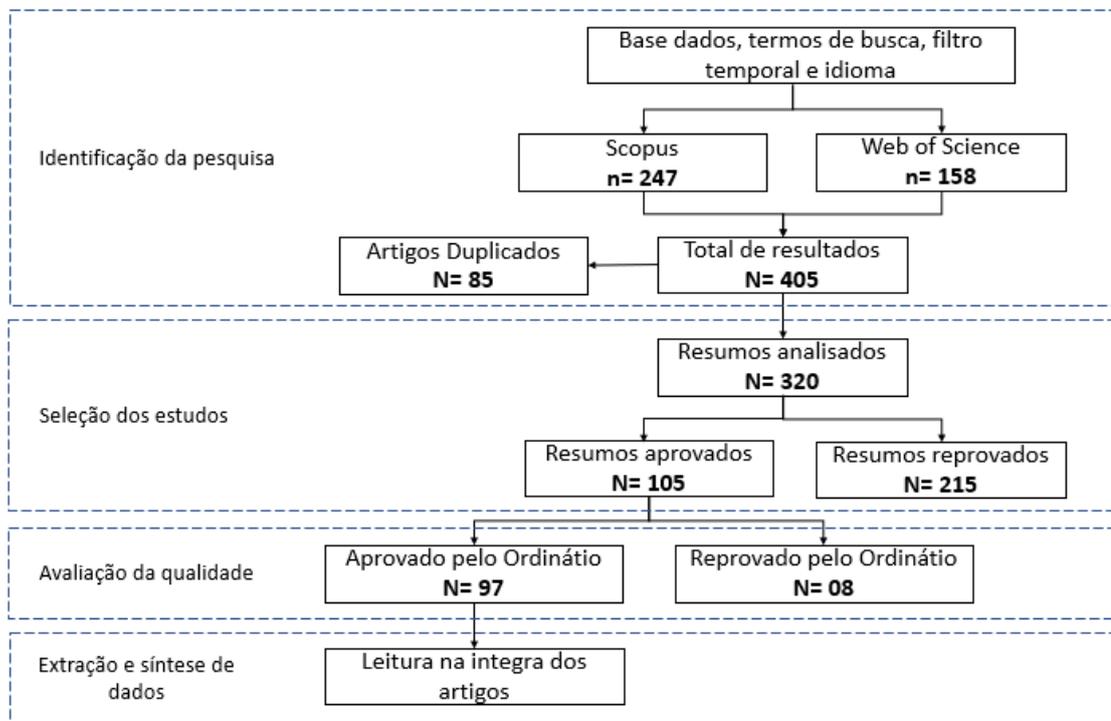


Figura 2.14- Etapas metodológicas adotadas na análise bibliométrica. Fonte: Autor.

Na etapa da identificação da pesquisa avaliaram-se artigos da *Scopus* e da *Web of Science*, que são duas bases de dados interdisciplinares de relevância acadêmica destacada na área de engenharia. Os termos de busca utilizados nas bases de dados foram “*Twin disc*” or “*Twin-disc*” or “*Twin disk*” or “*Twin-disk*” and “*Wheel*” and “*Rail*” com o objetivo de direcionar e restringir a busca para o uso do tribômetro disco-contra-disco na área ferroviária. A busca foi realizada em todo o texto do artigo, incluindo as referências bibliográficas.

Com interesse no desenvolvimento recente, foi aplicado um filtro temporal e avaliados apenas os artigos referentes aos últimos 10 anos. Definiu-se também que a busca seria apenas

em periódicos, excluindo da análise artigos publicados em eventos científicos. Limitou-se a busca por artigos escritos no idioma inglês. Os acessos às bases de dados ocorreram ao longo do mês de julho de 2020.

A partir da busca realizada, identificaram-se 247 artigos na base de dados da *Scopus* e 158 artigos na base de dados da *Web of Science*, totalizando 405 artigos. Entretanto, observou-se que 85 artigos estavam presentes nas duas bases de dados. Com a exclusão dessas duplicações, foram identificados 320 artigos únicos.

Na etapa de seleção do estudo, todos os artigos tiveram seus resumos lidos e avaliados. O critério para inclusão do artigo nessa análise bibliométrica consistiu em avaliar se o artigo utilizou a máquina disco-contra-disco em sua metodologia para estudar algum tema relacionado com a área ferroviária. Os resumos aprovados nesta etapa foram classificados em um dos grupos abaixo, levando em consideração o objetivo geral do estudo.

- Gerenciadores de atrito: Artigos no quais os autores adicionaram algum produto com o objetivo de modificar o coeficiente de atrito entre a roda e o trilho;
- Condição ambiental: Artigos que retratam a influência climática e ambiental no contato roda/trilho;
- Condição operacional: Artigos que simulam condições de operação das vias férreas bem como o tipo de composição e influência do tipo carga transportada;
- Avaliação de material para trilhos e rodas: Artigos que tratam do desenvolvimento de novos aços para utilização na área ferroviária ou que comparam o desempenho de diferentes materiais;
- Simular defeitos e suas consequências: Artigos que geram defeitos característicos de rodas e trilhos previamente ou durante o ensaio disco-contra-disco buscando compreender os mecanismos de crescimento dos defeitos, a influência no desgaste e as maneiras de mitigá-las;
- Tratamento superficial de trilhos e rodas: Artigos que abordam algum tratamento superficial utilizado para recuperar ou melhorar as características desses ativos ferroviários;
- Validar ou propor modelo computacional/matemático: Artigos que usam os resultados do ensaio da disco-contra-disco para alimentar modelos computacionais, ou ainda usam esses dados para validar modelos matemáticos e computacionais;

- Sinalização ferroviária: Artigos que se destinam a estudar como a sinalização ferroviária pode ser influenciada pelo terceiro corpo, bem como os impactos dos materiais utilizados na sinalização ferroviária;
- Outros: Demais artigos que utilizam a disco-contra-disco na área ferroviária e que não possuem objetivo de estudo categorizado em nenhuma das categorias mencionadas.

Para avaliar a relevância dos artigos aprovados na segunda etapa foi utilizado o índice *InOrdinatio*, desenvolvido por Pagani e colaboradores (2015). O índice é construído levando-se em consideração o ano de publicação, o número de citações do artigo e o fator de impacto da revista na qual o artigo foi publicado (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015). Sendo assim, foi possível identificar de maneira imparcial os artigos mais relevantes para compor esta análise sistemática. Neste trabalho, foram selecionados artigos com *InOrdinatio* maior ou igual a 10.

A última etapa metodológica consistiu na extração e síntese de dados dos 97 artigos selecionados. Essa etapa aconteceu de duas formas. A primeira compreendeu a utilização do software aberto *Bibliometrix* para a realização de um estudo bibliométrico, identificando os principais autores, interações entre autores, principais revistas que publicam sobre a temática, entre outras questões (ARIA; CUCCURULLO, 2017). A extração de dados aconteceu também por meio da leitura integral dos artigos.

Na Tabela 2.5, são apresentados os artigos identificados na literatura durante a busca sistemática nas bases de dados, e estes estão classificados de acordo com a categoria e exibidos em ordem decrescente considerando o *InOrdinatio*. Dessa forma, a primeira referência é o artigo de maior relevância dentro da categoria. Observa-se que o número de artigos na categoria de gerenciamento de atrito e avaliação de material para trilhos e rodas representa mais de um terço das publicações, o que os tornam os temas mais explorados pela academia.

Tabela 2.5 - Classificação dos artigos levantados na revisão sistemática.

Tema	Nº artigos	Referências
Avaliação de material para trilhos e rodas	16	(SEO <i>et al.</i> , 2016),(ZAPATA; JARAMILLO; TORO, 2011),(CHEN <i>et al.</i> , 2016b),(ZHU <i>et al.</i> , 2018),(LI; HUANG; HUANG, 2019),(LI; GUO; ZHAO, 2019),(SANTA <i>et al.</i> , 2019),(LI <i>et al.</i> , 2016),(CHRISTOFOROU; FLETCHER; LEWIS, 2019),(REZENDE <i>et al.</i> , 2020a),(ZHOU <i>et al.</i> , 2020),(SHI <i>et al.</i> , 2019b),(SOLANO-ALVAREZ; FERNANDEZ GONZALEZ; BHADESHIA, 2019), (REZENDE <i>et al.</i> , 2019),(SEO <i>et al.</i> , 2019a),(LIU <i>et al.</i> , 2020a)
Condição ambiental	13	(WANG <i>et al.</i> , 2011b),(WANG <i>et al.</i> , 2013),(FACCOLI <i>et al.</i> , 2018),(VOLTR; LATA, 2015),(HUANG <i>et al.</i> , 2018),(ISHIZAKA; LEWIS; LEWIS, 2017),(NAKAHARA <i>et al.</i> , 2011),(SHI <i>et al.</i> , 2018),(WHITE; LEWIS, 2019),(LEE, 2020a),(ISHIZAKA <i>et al.</i> , 2020), (CHEN; TANIMOTO, 2018),(ZHU; YANG; WANG, 2015)
Condição operacional	11	(CHEN <i>et al.</i> , 2011),(HE <i>et al.</i> , 2016),(ZHOU <i>et al.</i> , 2016),(RAMALHO, 2015),(ZHOU <i>et al.</i> , 2015),(WANG <i>et al.</i> , 2017a),(LEE; NAMGUNG; KWON, 2018),(LEE, 2020b), (SALAS VICENTE; PASCUAL GUILLAMÓN, 2019),(CHEN <i>et al.</i> , 2016a),(LEE, 2020c)
Gerenciamento de atrito	21	(WANG <i>et al.</i> , 2011a),(ARIAS-CUEVAS; LI; LEWIS, 2011),(WANG <i>et al.</i> , 2014a),(HARDWICK; LEWIS; EADIE, 2014),(WANG <i>et al.</i> , 2016a),(CAO <i>et al.</i> , 2016),(OMASTA <i>et al.</i> , 2015),(LEWIS <i>et al.</i> , 2014a),(MAYA-JOHNSON; FELIPE SANTA; TORO, 2017),(HARDWICK; LEWIS; STOCK, 2017),(WANG <i>et al.</i> , 2017b), (LEWIS <i>et al.</i> , 2014b),(SHI <i>et al.</i> , 2020),(SHI <i>et al.</i> , 2019a),(HUANG <i>et al.</i> , 2017),(MESSAADI; OOMEN; KUMAR, 2019),(SEO <i>et al.</i> , 2018),(PÉREZ-DE BRITO <i>et al.</i> , 2020),(BUCKLEY-JOHNSTONE <i>et al.</i> , 2019a),(CAMILO VELEZ <i>et al.</i> , 2020),(GALAS <i>et al.</i> , 2017)
Simular defeitos e suas consequências	10	(SEO <i>et al.</i> , 2011),(ZHAO <i>et al.</i> , 2016),(ZHAO <i>et al.</i> , 2018),(ZENG <i>et al.</i> , 2017),(KATO; SUGETA; NAKAYAMA, 2011),(VARGOLICI <i>et al.</i> , 2016),(ZENG <i>et al.</i> , 2020),(ZHAO <i>et al.</i> , 2020),(HE <i>et al.</i> , 2017),(KATO; KATO; MAKINO, 2016)
Sinalização ferroviária	03	(LEWIS <i>et al.</i> , 2016a),(BEATY <i>et al.</i> , 2016),(LEWIS <i>et al.</i> , 2011)
Tratamentos superficiais em trilhos e rodas	10	(LEWIS; LEWIS; FLETCHER, 2015),(LEWIS <i>et al.</i> , 2016b),(ZENG <i>et al.</i> , 2014),(WANG <i>et al.</i> , 2016b),(ZHU <i>et al.</i> , 2019),(WANG <i>et al.</i> , 2016c),(LI

		<i>et al.</i> , 2014),(LU <i>et al.</i> , 2019),(SEO <i>et al.</i> , 2019b),(ZHANG; LIAN; WANG, 2019)
Validar ou propor modelo computacional ou matemático	05	(DONZELLA <i>et al.</i> , 2011),(SEO <i>et al.</i> , 2013),(SOLANO-ALVAREZ <i>et al.</i> , 2017),(VASIC; FRANKLIN; FLETCHER, 2011),(LEE, 2018)
Outros	08	(GARNHAM; DAVIS, 2011),(ZHU <i>et al.</i> , 2015),(LIU <i>et al.</i> , 2020b),(LIU <i>et al.</i> , 2020c),(MESARITIS <i>et al.</i> , 2020),(HIENSCH; BURGELMAN, 2019),(LIU <i>et al.</i> , 2020e),(WANG <i>et al.</i> , 2016d)

Fonte: Autor.

Na Figura 2.15 é apresentada a distribuição das publicações por tema no período estudado. É possível identificar que existe uma amplificação no número de publicações com o passar do tempo, tendo o último biênio o com o maior número de publicações da última década. Em termos percentuais, houve um aumento de 283% no número de publicação no último biênio em relação ao primeiro biênio analisado.

O fato mostra que os estudos que utilizaram o tribômetro disco-contra-disco continuam despertando interesse da comunidade acadêmica e que ainda existe muito campo para o desenvolvimento de pesquisas explorando as aplicações na área ferroviária.

Outro ponto observado é a tendência dos pesquisadores em direcionar seus estudos no último biênio ao tema “Avaliação de material para rodas e trilhos”. As publicações nessa temática representam 32% das publicações na atualidade. Uma explicação para esse fato apoia-se nas seguidas transformações da operação ferroviária devido ao crescimento do tráfego, à elevação da velocidade operacional, além de uma carga por eixo transportada cada vez maior. Esse novo cenário descrito exige cada vez mais dos materiais utilizados na fabricação dos componentes ferroviários (REZENDE *et al.*, 2020a).



Figura 2.15 - Distribuição das publicações dos artigos por tema e ano. Fonte: Autor.

A Figura 2.16 apresenta um mapa da ciência e suas interações técnicas. No mapa, é possível identificar onde os ensaios com o tribômetro disco-contra-disco aconteceram, permitindo identificar os países que, atualmente, possuem o equipamento em uso na atualidade e quantos artigos foram produzidos em cada país. O estudo identificou a presença do tribômetro disco-contra-disco em 12 países. Destacam-se a China e o Reino Unido como os países com mais artigos desenvolvidos, com o total de 40 e 23 respectivamente.

A formação de redes de pesquisa é uma tendência global e pode trazer uma série de benefícios para os envolvidos, como maior alcance na disseminação do conhecimento e acesso a laboratórios (ADAMS, 2012). Do ponto de vista da interação técnica, neste trabalho identificou a formação de algumas redes de pesquisa, identificadas no mapa pelas setas conectando os países envolvidos. Todas essas redes ainda são incipientes com apenas um artigo publicado, exceto, a rede formada entre Reino Unido e Canadá, que apresenta 5 artigos publicados de maneira conjunta e está em destaque no mapa com sua linha em cor vermelha.



Figura 2.16 - Países que desenvolvem pesquisas com o uso do tribômetro disco-contra-disco na área ferroviária e conexões com formação de redes de pesquisa. Fonte: Autor.

Apesar de que se tenha identificado pouca colaboração nas produções científicas entre os diferentes grupos de pesquisa, cabe destacar que, em 2017, Lewis e colaboradores publicaram um importante trabalho com a participação de pesquisadores que estudam a interface roda/trilho do Reino Unido, China, Canadá e Suécia. Nele, os autores reuniram as boas práticas adotadas para a realização dos ensaios e propuseram uma abordagem padrão para os ensaios no disco-contra-disco. O destaque para a publicação é que a adoção dessa abordagem padronizada permitirá uma maior facilidade na comparação de dados entre as publicações futuras (LEWIS *et al.*, 2017).

## 2.7.2 Simulação das condições ambientais na ferrovia

Em razão da natureza do sistema roda/trilho, que trabalha aberto, as condições ambientais alteram a composição do tribossistema influenciando características como coeficiente de adesão, desgaste e vida à FCR dos componentes ferroviários (FACCOLI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2011b). Na literatura, é observada a capacidade de o ensaio disco-contra-disco ser utilizado para simular as diversas condições ambientais que podem ocorrer na ferrovia, como: Chuva, umidade relativa do ar, temperatura, areia do deserto e a presença de corpos de contaminantes, como folhas do outono.

Ao avaliar as pesquisas recentes sobre a temática, observou-se uma grande preocupação dos pesquisadores em avaliar a influência das variáveis ambientais no coeficiente de adesão. Algumas exceções foram encontradas, como o trabalho de Faccoli *et al.* (2018) que simulou condições de operação de uma ferrovia no deserto, avaliando a influência da areia na taxa de desgaste de rodas ferroviárias, e o trabalho de Lee (2020), que avaliou a geração de partículas aerotransportadas na condição de contato roda/trilho sob chuva.

Essa preocupação justifica-se no fato de que o coeficiente de adesão mostrou-se ser muito influenciado pelas condições ambientais. Nos trabalhos avaliados, notou-se uma queda no coeficiente de adesão para as seguintes condições: condições úmidas induzidas por chuva (NAKAHARA *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2011b, 2013), principalmente na condição com pouca chuva (WHITE; LEWIS, 2019), em condições com contaminação com folha (ISHIZAKA *et al.*, 2020) ou aumento da umidade relativa do ar (SHI *et al.*, 2018). Já para condições de baixa temperatura, observou-se aumento do coeficiente de adesão em relação à temperatura ambiente (SHI *et al.*, 2018).

Do ponto de vista metodológico, diversas estratégias já foram utilizadas para simular os distintos meios. As mais simples consistiam em adicionar água durante o ensaio de maneira controlada. Assim, a chuva pôde ser simulada adicionando água através de seringas, pipetas (WHITE; LEWIS, 2019), ou, até, sistema com bombeamento automático (LEE, 2020a). Para simular alguns meios, foi necessário acoplar câmaras no tribômetro afim de criar ambientes isolados. Shi e colaboradores (2018) acoplaram uma câmara criogênica para estudar a influência de baixas temperaturas no disco-contra-disco. No estudo, os autores conseguiram simular condições de até -40 °C. Já Nakahara e colaboradores (2011) acoplaram uma câmara climática no tribômetro, permitindo simular condições de umidade variando de 35 a 95 (%UR).

Na Figura 2.17 é apresentado como os autores simularam todos os meios que compõem essa revisão.

	Ref.	Simulações na twin disc
Chuva	White; Lewis (2019)	Adição de água 2,5 µl/s, 4 µl/s, 15 µl/s, 25 µl/s e 100 µl/s em discos pré oxidados. <b>P= 900 MPa, D= 0,2 - 1% e V= 0,98m/s por 5.000 ciclos.</b>
	Wang <i>et. al.</i> (2013)	Adição de água 1 ml/min, 5 ml/min e 20 ml/min. <b>P= 1050-1194 MPa, D= 3% e V= 25,1 m/s por 500 ciclos</b>
	Wang <i>et. al.</i> (2011)	Adição de água 5 ml/min. <b>P= 1005-1190 MPa, D= 1%, por 500 ciclos</b>
	Nakahara <i>et. al.</i> (2011)	Uso de câmara climática mantendo condições de 30°C e 60% RA e adição de 200 ml/min de água. <b>P= 800 MPa, D= 0,7% e V= 1,26m/s por 600 segundos.</b>
	Lee (2020)	Adição de água 7 L/min. <b>P= 700-1200 MPa, D= 3%, V= 25,1 m/s por 500 ciclos.</b>
	Zhu <i>et. al.</i> (2016)	Uso de câmara climática para gerar camadas óxidos. Testes na twin disc com vazão de água à 0,5 ml/min. Simular efeito de chuva e óxidos presentes no material. <b>P= 800 MPa, D= 0,91 - 9,43% e V= 0,84 m/s por 3600 segundos.</b>
	White; Lewis (2019)	Adição hematita com concentração variando de 30-100% em água. Taxa de aplicação de 2 ml/min e 6 ml/min. Simular efeito de chuva mais óxidos presentes no material rodante. <b>P= 1.500 MPa, D= 2% e V= 0,98m/s por 5.000 ciclos.</b>
Umidade relativa	Shi <i>et. al.</i> (2018)	Uso de câmara climática permitindo simular a 20 ° C distintas UR (35%, 55%, 75%, 95%). <b>Força normal= 347 N, D= 0,17-9,43% e V= 0,41m/s por 3.000 ciclos)</b>
Temperatura	Shi <i>et. al.</i> (2018)	Uso de câmara criogênica permitindo simular distintas temperaturas. 20 °C, 0 °C, -20 °C e -40 °C. <b>Força normal= 347 N, D= 0,17-9,43% e V= 0,41m/s por 3.000 ciclos)</b>
Areia do deserto	Facolli <i>et. al.</i> (2018)	Adição de 9 g/min de areia com características similar a areia transportada pelo vento do deserto para o contato roda trilho. <b>P= 1100 MPa, D= 1% e V= 1,57 m/s por 10.000 -130.000 ciclos .</b>
Folhas do outono	Ishizaka <i>et. al.</i> (2020)	Adição de 1 gota/2s de suspensão do pó de folhas de sicômoro. <b>P= 1200 MPa, D= 0,5 - 2% e V= 0,98 m/s por 180 segundos .</b>

Figura 2.17- Simulação no ensaio disco-contra-disco do efeito das condições ambientais no contato roda/trilho. Fonte: Autor.

### 2.7.3 Simulação das condições operacionais na ferrovia

As operações ferroviárias vêm passando por seguidas transformações em razão do aumento do tráfego, elevação da velocidade operacional, além da exigência de maior carga por eixo. Todas estas modificações tornaram o contato entre rodas e trilhos mais severos, elevando a necessidade de estudos que relacionem as mudanças das condições operacionais com os mecanismos de falhas das rodas e trilhos, visando garantir a segurança da operação, controle e redução de custos, além de propiciar melhores práticas de manutenção.

Dessa forma, diversos estudos foram conduzidos na última década correlacionando os parâmetros de ensaios pressão de contato, escorregamento (longitudinal e lateral) e velocidade do tribômetro disco-contra-disco com condições operacionais de campo.

A velocidade de ensaio, a pressão de contato e o escorregamento têm influência no coeficiente de adesão e na taxa de desgaste (CHEN *et al.*, 2016a; RAMALHO, 2015; WANG *et al.*, 2017a; ZHOU *et al.*, 2016). Ademais, os fatores que mais influenciam a taxa de desgaste são a carga normal, o escorregamento, a velocidade do trem e a contaminação da via (SALAS VICENTE; PASCUAL GUILLAMÓN, 2019).

A pressão de contato no ensaio relaciona-se com a carga por eixo transmitida pela roda ao trilho. As cargas por eixo já têm alcançado valores de 40 toneladas por eixo na Austrália e nos EUA (LUNDÉN; PAULSSON, 2009). Em campo, a pressão na região de contato da pista de rolamento com o topo do boleto alcança valores máximos de aproximadamente 1500 MPa e, na região da flange da roda com o canto de bitola, podem-se alcançar valores de até 2700 MPa (LEWIS; OLOFSSON, 2009).

Já o escorregamento varia com a condução do trem, se ele está freando ou acelerando além do traçado da via. O escorregamento ainda é responsável pela ocorrência de danos por conta dos elevados aquecimentos localizados de regiões da roda e/ou do trilho em função da baixa adesão e elevado escorregamento (CHEN *et al.*, 2011). Em tração, o valor máximo alcança aproximadamente 1-2% (LEWIS; OLOFSSON, 2009), em retas, o escorregamento é baixo e, em curvas, seu valor é maior. Alguns disco-contra-disco ainda possibilitam realizar um desalinhamento entre os eixos da máquina de forma a simular o que ocorre com a primeira roda do truque em curvas. Nessa condição, o rodeiro tenta subir o trilho externo de forma que quanto menor o raio da curva, maior será o ângulo de ataque. Uma curva com raio de 2000 m oferece um ângulo de ataque em torno de 0,4° (HE *et al.*, 2016).

O escorregamento é conseguido no disco-contra-disco pela diferença de velocidade entre os discos. Essa característica é alcançada mediante mecanismos que possibilitam, em alguns casos, a obtenção de quaisquer valores de escorregamento, enquanto, em outras máquinas apenas alguns valores previamente determinados no projeto do equipamento são obtidos. Para o cálculo do escorregamento, não há uma padronização. Ao avaliar a literatura recente, foram identificadas três diferentes formas de cálculos que, em baixos valores de escorregamento apresentam resultados quase idênticos (LEE, 2020c; RAMALHO, 2015; ZHOU *et al.*, 2016). No entanto, em maiores escorregamentos, os resultados apresentam uma diferença mais significativa. Na maioria dos casos os discos que simulam o trilho apresentam menores

velocidades em relação aos da roda. Isso influencia significativamente no comportamento das trincas de FCR.

A velocidade também varia muito de acordo com o tipo de transporte realizado. Trens de carga geralmente não ultrapassam 90 km/h, ao passo que trens de passageiros de alta velocidade podem alcançar até 350 km/h.

No ensaio disco-contra-disco é possível simular a velocidade tangencial da roda e sua velocidade angular. A simulação das velocidades tangenciais de campo em máquinas de ensaio cujos discos são pequenos não é simples. Para a velocidade de operação em ferrovias ser simulada na máquina de ensaio, seria necessário um número de rotações muito elevado. Para exemplificar, um disco de ensaio com 50 mm de diâmetro deveria rotacionar a 9500 RPM para alcançar a velocidade de 90 km/h. Assim, por limitações nas máquinas, a maioria dos autores conduzem seus ensaios com velocidades bem inferiores às observadas em campo (CHEN *et al.*, 2011; LEE; NAMGUNG; KWON, 2018; LEE, 2020b, 2020c). Para resolver esse problema algumas máquinas possuem discos maiores da ordem de 300 – 1050 mm (HE *et al.*, 2016; LEE, 2020b). Alguns autores também utilizam o método da velocidade angular. Eles correlacionam a velocidade angular em campo com a velocidade do tribômetro (HE *et al.*, 2016), o que conduz a menores velocidades lineares. Esse método parece mais indicado para ser utilizado em situações de elevada velocidade.

Os parâmetros operacionais da ferrovia estão relacionados aos parâmetros do ensaio disco-contra-disco da forma, como apresentado na Figura 2.18.

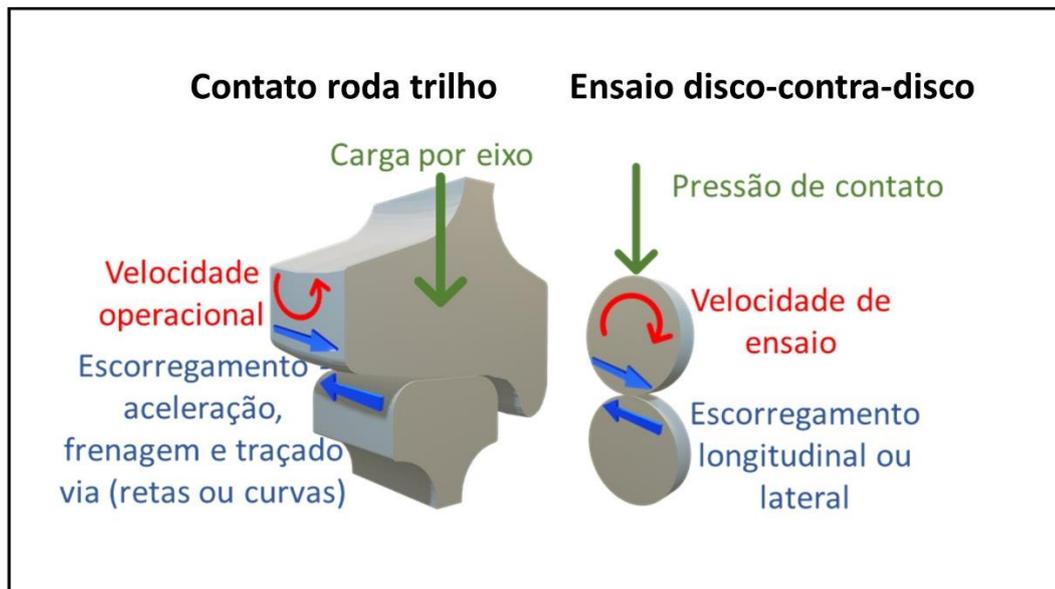


Figura 2.18- Correlação de parâmetros operacionais de campos com os utilizados no ensaio disco-contra-disco e a faixa dos valores utilizados nos ensaios da categoria. Fonte: Autor.

A influência da pressão de contato, do escorregamento e da velocidade na taxa de desgaste e no coeficiente de atrito deve ser acompanhada do controle e acompanhamento de outros parâmetros que se relacionam com alterações no mecanismo de desgaste. A rugosidade da superfície, a temperatura do ensaio e a presença do terceiro corpo podem alterar significativamente tal comportamento (CHEN *et al.*, 2011, 2016a; LEE; NAMGUNG; KWON, 2018; LEWIS *et al.*, 2017; ZHOU *et al.*, 2016). Diante disso, a quantificação da relação entre os danos e os parâmetros operacionais é bem complexa (HE *et al.*, 2016).

#### 2.7.4 Principais técnicas empregadas para caracterizar o material após o ensaio disco-contra-disco

A Tabela 2.6 apresenta as principais técnicas de caracterização que são utilizadas após a realização do ensaio disco-contra-disco quando o objetivo é avaliar um material para fabricação de roda e trilhos. Os dados mostram que as principais análises realizadas são a medição da perda de massa / taxa de desgaste e a avaliação da superfície desgastada. A avaliação da superfície tem sido realizada com vista desarmada (ZHU *et al.*, 2018), ou utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (LI *et al.*, 2016; REZENDE *et al.*, 2020a). Rezende *et al.* (2019) também utilizaram perfilometria tridimensional para caracterização da superfície desgastada (LI *et al.*,

2016). A análise da superfície desgastada possibilita a observação de trincas de FCR e presença de óxidos (ZHOU *et al.*, 2020), delaminação, *spalling* e *ratcheting* (REZENDE *et al.*, 2020a), corrugação (SEO *et al.*, 2019a), ou a presença de debris (LIU *et al.*, 2020a) também são observações possíveis nessa análise.

O corte da seção transversal da amostra amplia a profundidade da avaliação do material. A camada deformada, o ângulo, a profundidade e o comprimento das trincas podem ser medidos e correlacionados com as propriedades dos materiais e variáveis do ensaio. O encruamento da superfície em contato também tem a capacidade de trazer informações relevantes para a análise. Seo *et al.* (2016) avaliaram como o escorregamento altera a forma, a profundidade e o encruamento da camada deformada (SEO *et al.*, 2016). Rezende *et al.* (2020) observaram que o melhor comportamento da estrutura bainítica está relacionado a sua melhor capacidade de absorver a deformação plástica em relação a estrutura perlítica (REZENDE *et al.*, 2020a).

Zhou et al (2020) utilizaram a análise das características das trincas em corte transversal e observaram variações nos comprimentos médios e máximos das trincas em três tipos de aço e com variação de temperatura (ZHOU *et al.*, 2020). Já Zhu et al (2018) verificaram mudanças nos ângulos das trincas conforme foi alterado o deslizamento, variando de ângulos máximos de 7° com 0,5% de escorregamento até alcançar 64° para 18% de escorregamento (ZHU *et al.*, 2018).

Li *et al.* (2019) avaliaram a espessura média dos debris de dois aços com microestruturas diferentes e a maior taxa de desgaste se correlacionou com maiores espessuras dos debris (LI; HUANG; HUANG, 2019). Já Zapata *et al.* (2011) confirmaram mudanças nos mecanismos de desgaste de dois aços, bainítico e perlítico, pela forma dos debris (ZAPATA; JARAMILLO; TORO, 2011).

Tabela 2.6 - Principais análises realizada após ensaio disco-contra-disco para caracterizar os aços empregados em rodas e trilhos.

Artigo	Perda de massa	Análise de trincas	Camada deformada	COT	Mapa de desgaste	Análise visual da superfície desgastada	Análise dos debris
(REZENDE <i>et al.</i> , 2020a)	XXX	XXX	XXX			XXX	
(ZHOU <i>et al.</i> , 2020)	XXX	XXX	XXX	XXX		XXX	
(LIU <i>et al.</i> , 2020a)	XXX	XXX	XXX			XXX	XXX
(SHI <i>et al.</i> , 2019b)	XXX					XXX	
(SOLANO-ALVAREZ; FERNANDEZ GONZALEZ; BHADESHIA, 2019)	XXX						
(LI; HUANG; HUANG, 2019)	XXX		XXX			XXX	
(REZENDE <i>et al.</i> , 2019)	XXX	XXX				XXX	
(SEO <i>et al.</i> , 2019a)	XXX	XXX	XXX	XXX		XXX	
(LI; GUO; ZHAO, 2019)	XXX		XXX			XXX	
(CHRISTOFOROU; FLETCHER; LEWIS, 2019)	XXX		XXX			XXX	
(ZHU <i>et al.</i> , 2018)	XXX	XXX		XXX	XXX	XXX	XXX
(LI <i>et al.</i> , 2016)			XXX			XXX	
(SEO <i>et al.</i> , 2016)	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	
(ZAPATA; JARAMILLO; TORO, 2011)	XXX		XXX			XXX	XXX

Fonte: Autor.

A escolha das técnicas utilizadas pelos autores mostra uma preocupação para compreender o efeito da microestrutura tanto na resistência ao desgaste do material quanto no comportamento a FCR do material. As técnicas em sua maioria são simples, com uso de equipamentos comumente encontrados nos laboratórios acadêmicos, o que facilita a replicação dessas análises.

## 2.8 ÓXIDOS NO CONTATO RODA/TRILHO

O processo de oxidação do aço é um mecanismo muito bem compreendido, que apresenta como produto a formação de diversos tipos de óxidos, sendo a Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e a Wustita ( $\text{FeO}$ ) os óxidos mais comuns. No contato roda/trilho, as condições de contato e o meio ambiente vão influenciar na formação e no tipo de óxido de ferro formado nas rodas e trilhos. A característica dinâmica do contato roda/trilho faz com que essa camada de óxido seja constantemente removida e regenerada durante os ciclos entre a roda e o trilho, fazendo com que esses óxidos atuem como terceiros corpos promovendo mudanças no sistema roda/trilho, como alteração na taxa de desgaste e na aderência das rodas.

O mecanismo de formação dos óxidos na ferrovia pode ocorrer por dois mecanismos. No primeiro, a oxidação ocorre por conta das altas forças e temperaturas produzidas no contato roda/trilho. O segundo mecanismo é proveniente da oxidação ambiental, a partir da qual condições ambientais como condensação, precipitação ou alta umidade causam a oxidação da camada superficial do aço (WHITE; LEWIS, 2019).

A influência de detritos de desgaste e óxidos de ferro já foi testada anteriormente usando testes de laboratórios, e percebeu-se que a presença do óxido no contato roda/trilho pode afetar a adesão da roda e trilho. (BUCKLEY-JOHNSTONE *et al.*, 2019b; WHITE; LEWIS, 2019),

Quanto ao comportamento tribológico, identificou-se que a presença da Magnetita pode atuar reduzindo o coeficiente de atrito enquanto a presença de Hematita, em virtude da sua característica de alta dureza, quando despreendida na camada de óxido, atua como abrasivo no contato, elevando o coeficiente de atrito e o desgaste (SONE *et al.*, 2008; SUZUMURA *et al.*, 2011; ZHU, 2017).

Zhu afirma que os estudos que enfocam a influência dos óxidos de ferro não foram realizados de forma sistemática até o século 21 (ZHU, 2017). O autor apresenta os ensaios pino disco e disco-contra-disco como alternativas para se estudar a influência dos óxidos no contato roda/trilho. Um resumo do comportamento tribológico de diversos óxidos é apresentado na Tabela 2.7. Entretanto, o estudioso faz uma ressalva para os trabalhos que empregam disco-contra-disco, pois, até hoje, esses ensaios normalmente não controlam a temperatura durante os experimentos, havendo a necessidade de estudos para se avaliar o efeito da temperatura na formação de óxidos.

Tabela 2.7 - Correlação de parâmetros operacionais de campos com os utilizados no ensaio disco-contra-disco e a faixa dos valores utilizados nos ensaios da categoria.

Tipo	Nome	Fórmula	Desempenho tribológico
Anidro	Wustita	FeO	Sem estudos
	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	É benéfico, podendo reduzir o atrito e o desgaste
	Hematita	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Abrasivo
	Maghemita	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sem estudos
Hidratado	Goetita	α-FeOOH	Abrasivo
	Akaganeíta	β-FeOOH	Abrasivo
	Lepidocrocita	γ-FeOOH	Abrasivo

Fonte: Adaptado de Zhu (2017).

Em relação as técnicas empregadas para a caracterização dos óxidos tanto em campo quanto em laboratório, as mais utilizadas são a Difração de Raio-X e a Espectrometria Raman. (SONE *et al.*, 2008; SUZUMURA *et al.*, 2011).

## 2.9 TENSÕES RESIDUAIS NO CONTATO RODA/TRILHO

O estudo das tensões residuais nos componentes ferroviários como rodas e trilhos e bastante discutido pela academia e concessionárias ferroviárias, na medida em que as tensões residuais podem ter papel importante tanto no retardo, quanto na aceleração da vida em fadiga desses ativos. Assim, no processo de fabricação das rodas, é realizado um tratamento térmico superficial cujo objetivo é gerar tensões residuais compressivas e, dessa forma, reduzir a propagação de trincas de fadiga nesses componentes (REZENDE *et al.*, 2020b).

Entretanto, as solicitações durante o serviço, como carga por eixo, diferentes níveis de deslizamento e aquecimento gerados pela frenagem, são capazes de fazer com que essas tensões residuais se invertam, passando a ser trativas (SEO *et al.*, 2008). Caso isso ocorra, esses

componentes estão mais sujeitos a terem maior taxa de desgaste e em casos, mais extremos falharem de maneira catastrófica.

Então, conhecer o campo de tensões residuais desses componentes auxiliará nas tomadas de decisões que poderão prolongar a vida útil desses ativos, além de tornar a operação ferroviária mais segura. Diversas técnicas já foram empregadas para avaliar tensão residual em componentes ferroviários. Na Tabela 2.8 são apresentadas algumas dessas técnicas aplicadas.

Tabela 2.8 - Principais técnicas empregadas para avaliação de tensão residual de componentes ferroviários.

Técnica	Estudo	Autor
Difração de Raio X	Tensão residual do flange de rodas ferroviárias classes D e C.	(REZENDE <i>et al.</i> , 2020b)
Difração de Nêutrons	Distribuição de tensão residual de trilhos revestidos a laser	(ROY <i>et al.</i> , 2020)
Ruído Magnético Barkhausen	Análise qualitativa das tensões residuais geradas em aços de roda perlíticos e bainíticos após ensaio disco-contra -disco	(REZENDE <i>et al.</i> , 2020a)
Furo Cego	Tensão residual na zona de contato foi medida após ensaio disco-contra-disco para avaliar a tensão residual de rodas ferroviárias	(SEO <i>et al.</i> , 2008)
Ultrassom	Método de ultrassom para medir tensões residuais e detectar tensões residuais na roda ferroviária usando o método de medição de ultrassom	(STRÁŽOVEC <i>et al.</i> , 2019)

Fonte: Autor.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão discutidos os materiais e métodos que foram utilizados para compreender como o ensaio disco-contra-disco pode ser aplicado na área ferroviária e qual o efeito da temperatura para diferentes escorregamentos no ensaio tribológico disco-contra-disco. A parte experimental foi realizada na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), no Centro de Pesquisa e Inovação e Desenvolvimento do estado do Espírito Santo (CPID), no Instituto Federal de Educação do Espírito Santo (Ifes), na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). A participação de diferentes instituições mostra a característica de um projeto de pesquisa em rede, que é uma tendência global e traz como benefício o acesso a diferentes laboratórios e um maior alcance na disseminação do conhecimento (ADAMS, 2012).

#### 3.1 RESUMO METODOLÓGICO

Nesta seção é apresentado um resumo metodológico com todo o percurso experimental adotado neste estudo, conforme pode ser observado na Figura 3.1.

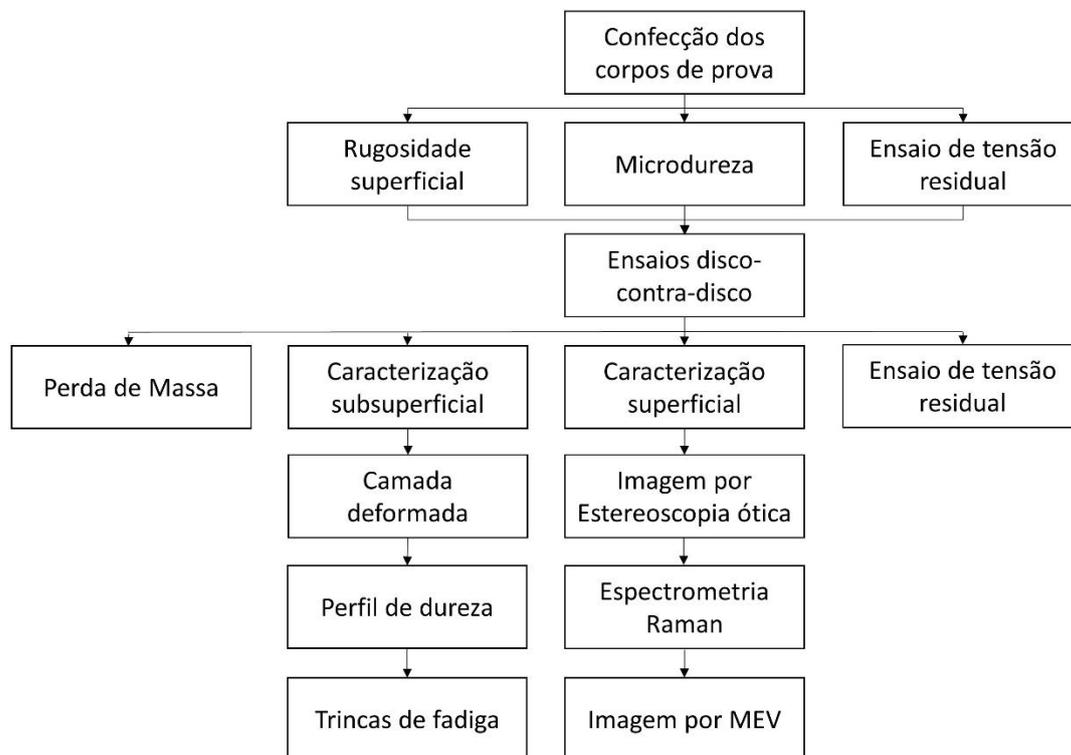


Figura 3.1- Fluxograma metodológico adotado nesta tese. Fonte: Autor.

## 3.2 MATERIAL DE ESTUDO

O aço estudado no presente trabalho é de uma roda forjada classe C. Os corpos de provas retirados da roda tiveram sua composição química e microestrutural avaliada.

### 3.2.1 Composição química

A composição química do aço foi verificada por meio de realização de espectrometria de emissão ótica, na própria empresa fornecedora da roda, utilizando um espectrômetro da marca *Thermo Scientific*, modelo ARL 3460. A Tabela 3.1 apresenta a composição química do aço em estudo e o aço de referência especificado na norma AAR M-107. Constatou-se que o aço estudado apresenta composição química compatível ao especificado pela referida norma.

Tabela 3.1- Composição química do aço estudado (% massa).

Aço	C	Si	Mn	P	S
Estudado	0,68	0,34	0,83	0,013	0,010
AAR M-107	0,67-0,77	0,15-1,00	0,60-0,90	0,030 máx.	0,005-0,040

Fonte: Autor

### 3.2.2 Caracterização microestrutural

Para a caracterização microestrutural inicial, foram utilizadas técnicas de microscopia ótica (M.O) e microestrutura eletrônica de varredura (MEV). O M.O utilizado foi o da marca Kontrol, disponível no laboratório de metalografia do Ifes. Já o MEV utilizado foi a marca Zeiss, modelo EVO MA 15, disponível no Laboratório Multiusuário da FEM/Unicamp

Em ambas as análises, foi necessária uma preparação metalográfica que envolveu etapas de corte das seções analisadas em cortadoras metalográficas *Cut-off*, seguido, de lixamento manual com lixas de carbetto de silício de granulometria 180 a 1200# e de polimento utilizando pasta de diamante de 3, 1 e 0,25  $\mu\text{m}$ . Um ataque químico com Nital a 2% foi realizado para revelar a microestrutura do aço.

O espaçamento interlamelar da perlita também foi avaliado. Para isso, utilizou-se o método do Intercepto Linear, a partir do qual uma imagem bem definida da perlita é cortada transversalmente por uma linha e conta-se o número de lamelas de cementita que interceptam a linha. A equação 3.1 expressa o cálculo para o espaçamento interlamelar.

$$So = \frac{Lt}{I} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

Lt é o comprimento total da linha de intersecção

I é o Número de lamelas cementita que interceptam a linha

Neste trabalho, para cada micrografia avaliada, foram selecionadas 5 regiões distintas. A linha de referência traçada na micrografia foi feita com auxílio do *software*, de domínio público, *ImageJ*.

Na Figura 3.2, é possível visualizar a microestrutura do aço estudado neste trabalho. Trata-se de um aço com matriz perlítica, e a presença de ferrita no contorno de grãos.

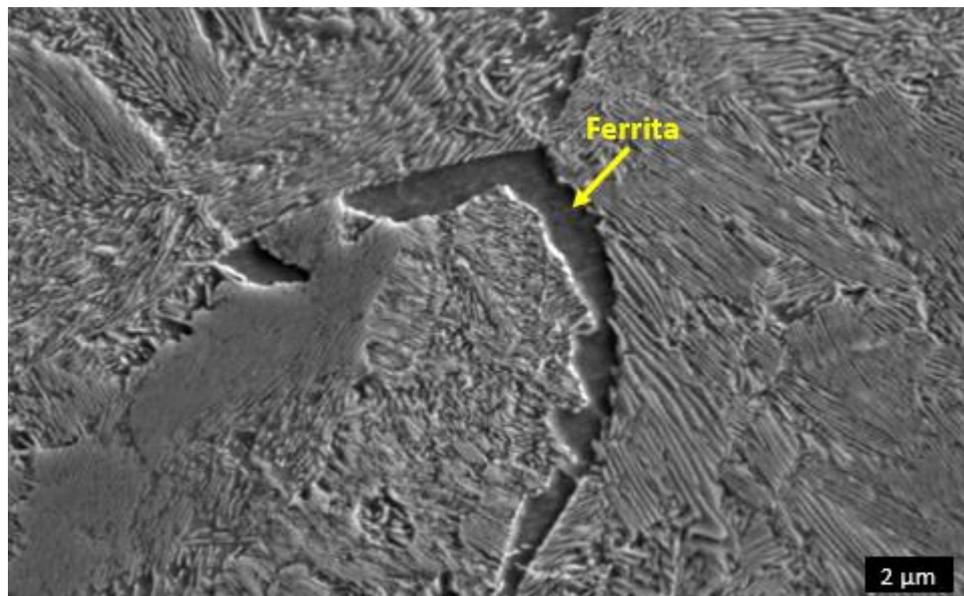


Figura 3.2 - Microestrutura do aço de roda classe C utilizado nesta tese (imagem obtida por MEV, com ataque químico com Nital a 2%). Fonte: Autor.

É bem conhecido que o espaçamento interlamelar da perlita desempenha um importante papel nas propriedades mecânicas dos aços perlíticos. Por esse motivo, tal espaçamento foi calculado e obteve-se o valor de  $0,1 \pm 0,01 \mu\text{m}$ . Esse resultado apresenta boa concordância com os aços perlíticos utilizados como componentes ferroviários. Hu e colaboradores (2021)

estudaram a evolução microestrutural de um aço de roda classe C que apresentava espaçamento interlamelar de  $0,09 \mu\text{m}$  (HU *et al.*, 2021a). Já Hu e colaboradores (2020a) avaliaram diferentes aços, e todos apresentaram espaçamento interlamelar entre  $0,200$  e  $0,238 \mu\text{m}$  e dureza inicial de  $354 \pm 10 \text{ HV}$ . Uma caracterização microestrutural mais detalhada desse aço, pode ser encontrada nos trabalhos de Rezende *et al.* (2019).

### 3.3 ENSAIOS DISCO-CONTRA-DISCO

#### 3.3.1 Equipamento

O tribômetro disco-contra-disco utilizado nesta tese foi desenvolvido com a parceria entre MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda e a Unicamp. O equipamento possui Privilégio de Inovação, protegido pelo depósito da patente N° BR1020170275914. Atualmente, o equipamento está disponível para uso no Laboratório de Tribologia da FEM-Unicamp.

As características construtivas do equipamento, que podem ser observadas na Figura 3.3, permitem a variação de três variáveis durante o ensaio: O escorregamento, a pressão de contato e a velocidade dos discos ensaiados. O escorregamento e a velocidade dos discos podem ser variados em virtude do controle independente dos motores 1 e 2. A pressão de contato é controlada pelo servo motor 3. O sistema de controle dessas variáveis ocorre em malha fechada. Por sua vez, o sistema de operação da máquina é realizado por um *software* desenvolvido especificamente para o equipamento, no qual é possível selecionar e acompanhar em tempo real informações de velocidade dos discos, carga e torque.

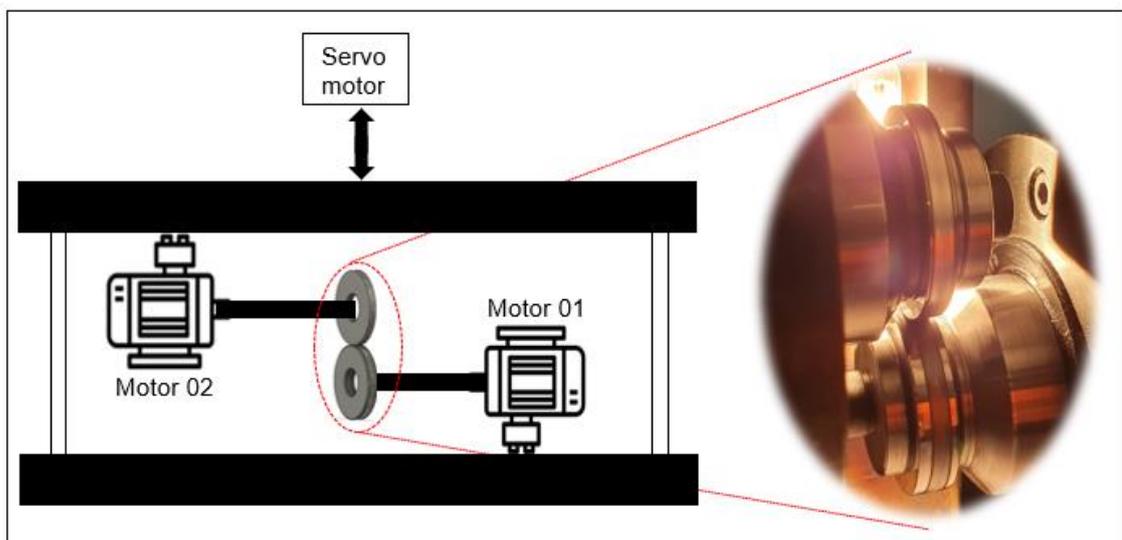


Figura 3.3 - Representação esquemática do equipamento disco-contra-disco. Fonte: Autor.

Recentemente, o tribômetro passou por melhorias com um projeto incremental de desenvolvimento de um sistema de aquecimento e controle de temperatura. Esse sistema permite a realização de testes em temperatura superior à ambiente, possibilitando simular condições climáticas e operacionais que ocorrem nas ferrovias.

Na Figura 3.4, é apresentado o sistema de aquecimento acoplado no equipamento disco-contra-disco. A câmara de aquecimento é fabricada de aço inoxidável e possui uma abertura direcionando o calor somente para os discos do ensaio, conforme pode ser visto na região (A) da Figura 3.4.

Para o aquecimento é utilizado uma lâmpada infravermelha com potência de 600 W. A medição da temperatura dos discos é realizada por um sensor de temperatura infravermelho (Optris - OPTCTLT20CFB3). O sensor fica localizado na frente dos discos a uma distância de 50 mm, o que garante um foco em uma região de 2,3 mm na superfície dos discos. A medida de temperatura é realizada logo após o contato entre os discos, no centro da pista de rolamento.

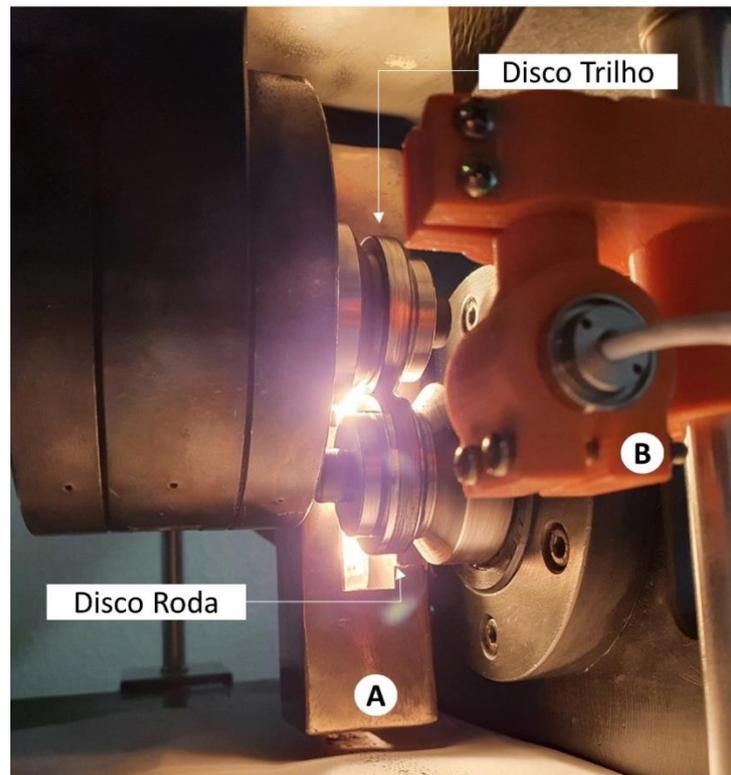


Figura 3.4- Sistema de aquecimento acoplado ao tribômetro disco-contra-disco. Em (A) a câmara de aquecimento utilizando uma lâmpada infravermelho e em (B) o sensor que faz a medição da superfície do disco Roda durante os ensaios no tribômetro. Fonte: Autor.

O controle de temperatura do sistema é realizado por um controlador PID, que recebe a informação da temperatura dos discos através do sensor infravermelho e controla a potência da lâmpada, gerando desse modo, o aquecimento dos discos.

### 3.3.2 Corpos de provas

Na literatura, observa-se a utilização de material de roda e de trilho para a realização dos ensaios disco-contra-disco, tornando mais real a simulação desse par tribológico. Esse planejamento experimental está sendo utilizado por muito pesquisadores, tanto nos trabalhos mais clássicos no estudo de componentes ferroviários como os trabalhos mais recentes publicados na literatura (BOLTON; CLAYTON, 1984; ZHOU *et al.*, 2022). Entretanto, muito desses trabalhos, como Ma e colaboradores (2016) e Rodriguez-Arana e colaboradores (2022) entre outros pesquisadores, justificam o comportamento tribológico dos discos de trilho e roda avaliando apenas o efeito de diferentes microestruturas entre esses dois componentes, ignorando as possíveis contribuições da dinâmica do contato roda/trilho (HUA *et al.*, 2022; MA *et al.*, 2016; RODRÍGUEZ-ARANA *et al.*, 2022). Dessa forma, neste trabalho, optou-se por realizar os ensaios com os dois discos do mesmo material. Como isso, foi permitido isolar o efeito de diferentes microestruturas e propriedades mecânicas, permitindo avaliar apenas o efeito da temperatura, do escorregamento e da dinâmica do contato roda/trilho no comportamento tribológico do material de roda.

Os corpos de provas para a realização do ensaio foram retirados de uma roda Classe C. A roda foi inicialmente fatiada ao longo do raio, seguido de um novo corte separando o aro. Os discos foram retirados da região do aro, paralelo ao passeio da roda, conforme pode ser observado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Em (a), desenho esquemático de uma roda ferroviária. Em (b), apresenta-se a região de retirada dos discos no aro da roda. Fonte: Autor.

A geometria dos discos é apresentada na Figura 3.6. O disco que será acoplado no motor de maior velocidade durante o ensaio receberá o nome de Disco Roda, por simular o comportamento da roda ferroviária, enquanto o disco que simulará o trilho e será utilizado no motor de menor velocidade se chamará de Disco Trilho.

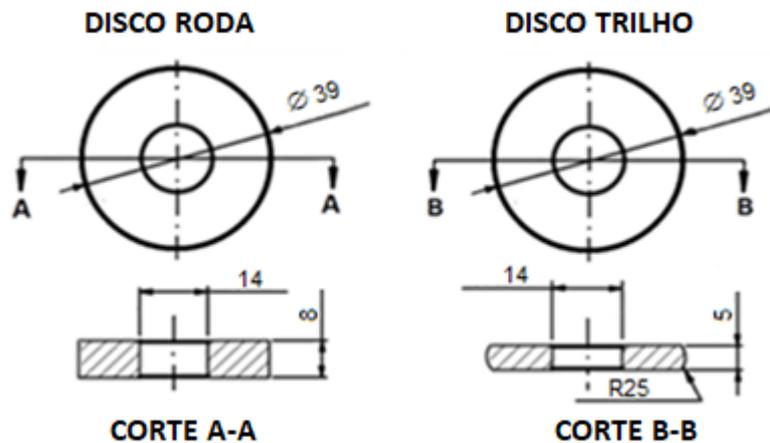


Figura 3.6- Desenho esquemático com as dimensões dos discos utilizados no ensaio disco-contra-disco. Fonte: Adaptado de Rezende (2020).

O disco Trilho apresenta um raio de curvatura na pista de rolamento, o que proporciona um contato hertziano não conforme do tipo plano-esfera, proporcionando maior pressão de contato no ensaio. Esse tipo de contato é comumente utilizado em ensaios disco-contra-disco que desejam simular as condições do contato roda/trilho (LEWIS *et al.*, 2017)

### 3.3.3 Análises antes do ensaio

A literatura retrata a influência da rugosidade e dureza do material no comportamento tribológico (CHEN *et al.*, 2016a). Assim, antes de realizar o ensaio disco-contra-disco são mensuradas a dureza e a rugosidade superficial para o controle experimental. A execução desses testes garante que todas as amostras apresentam as mesmas características superficiais iniciais.

### 3.3.3.1 Rugosidade

A rugosidade foi medida utilizando um rugosímetro de bancada da marca Mitutoyo, modelo SJ-210, disponível no Laboratório de Tribologia da FEM-UNICAMP. A medida é realizada na pista de rolamento após os discos passarem por um processo de lixamento visando garantir uma rugosidade  $Ra < 0,1$ .

As posições circunferenciais medidas foram as seguintes: 0, 90, 180 e 270 graus. Os parâmetros utilizados no rugosímetro para “*short cutoff*” são os apresentados a seguir:  $n = 10$ ,  $\lambda = 0,25$  mm e passo 0,5 mm/s de acordo com a norma ISO 4287:1997.

### 3.3.3.2 Microdureza

A microdureza dos discos foi medida na escala Vickers utilizando um microdurômetro *Future Tech* modelo *FV800* disponível no laboratório multiusuário da FEM/Unicamp. Para as medidas de microdureza, foi utilizada uma carga de 0,5 kgf aplicada por 15 segundos. Foram realizadas 12 indentações, espaçadas 30 graus em relação à anterior, em cada lado dos discos na região próxima à pista de rolamento. Todos os discos ensaiados possuíam dureza de  $360 \pm 10$  HV.

### 3.3.3.3 Limpeza e medida de massa

A última etapa preliminar à realização dos ensaios tribológicos é a limpeza dos discos. Nessa etapa, os discos são limpos inicialmente com água e sabão com o objetivo de remover a oleosidade superficial. Na sequência, realiza-se um banho ultrassônico com as amostras imersas em acetona P.A por 15 minutos. A secagem das amostras após a lavagem é feita com um jato de ar quente.

Depois de limpas, as amostras são cuidadosamente pesadas por meio de uma balança analítica da marca Shimadzu, modelo AUY220. A medida contém precisão de 0,0001 g. Todo o procedimento de limpeza e medida de massa ocorreu no laboratório de Fusão por Feixe de Elétrons da FEM-UNICAMP.

### 3.3.4 Condição de ensaio

Duas variáveis foram estudadas no ensaio disco-contra-disco, a temperatura e o escorregamento. Um grupo de amostras foram ensaiadas à temperatura ambiente e outro grupo de amostras ensaiadas a 60 °C. Quanto ao escorregamento, três níveis foram escolhidos para serem explorados neste trabalho: 1%, 3% e 5%. Todas as combinações entre temperatura e escorregamento foram testadas, totalizando 6 diferentes ensaios. Para cada combinação de experimento, foram realizadas três repetições.

Os ensaios aquecidos a 60 °C foram realizados em ciclos de aquecimento visando simular as alterações de temperatura que ocorrem na roda em função do traçado e de condições operacionais da ferrovia. Dessa forma, os testes iniciaram os primeiros 5 mil ciclos de ensaio à temperatura ambiente, seguidos de 5 mil ciclos a 60 °C, mais 5 mil ciclos sem aquecimento e finalizando com 5 mil ciclos a 60 °C, totalizando 20 mil ciclos.

A Figura 3.7 apresenta como ocorreram os ensaios em função do número de ciclos. Em vermelho são os ensaios aquecidos a 60 °C e, em azul, os ensaios à temperatura ambiente. Cabe ressaltar que os ensaios à temperatura ambiente apresentam, ao longo do procedimento experimental, uma elevação de temperatura em virtude do atrito entre os discos. Por essa razão, foi utilizado um sensor de temperatura infravermelho sem contato para acompanhar a evolução de temperatura durante o ensaio denominado Ensaio sem controle de temperatura.

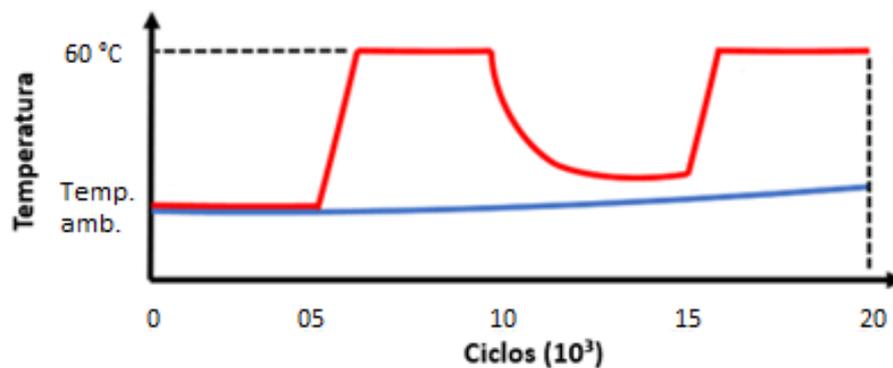


Figura 3.7 – Evolução da temperatura do ensaio em função do número de ciclos. Fonte: Autor.

A pressão de contato e a velocidade dos discos permaneceram constantes em todos os ensaios. Neste trabalho, a pressão máxima de Hertz foi adotada de 2200 MPa, obtida através

das equações descritas na Tabela 2.3. O valor foi escolhido, porque permite simular de maneira adequada as condições de operação ferroviária. A velocidade de rotação do denominado Disco Roda foi de 170 RPM, ao passo que o disco denominado Disco Trilho teve sua velocidade governada pela equação de escorregamento (equação 3.2), proposta por (FLETCHER; BEYNON, 2000).

$$Esc = 200 \left( \frac{VR*RR-VT*RT}{VR*RR+VT*RT} \right) \quad \text{eq. 3.2}$$

Onde:

$V_R$  é a velocidade em RPM no Disco Roda

$R_R$  é o Raio do Disco Roda

$V_T$  é a velocidade em RPM no Disco Trilho

$R_T$  é o Raio do Disco Trilho

Visando facilitar a comunicação e o entendimento do leitor, foi criada uma nomenclatura para os ensaios. Essa nomenclatura e um resumo das condições dos ensaios são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Nomenclatura adotada para cada condição de ensaio na disco-contra-disco.

Nome	Escorregamento (%)	Temperatura (°C)	Pressão (MPa)	Velocidade (RPM)	Ciclos (x10 <sup>3</sup> )
E1%60°C	1%	60 °C	2200	170	20
E1% Amb	1%	Ambiente			
E3%60°C	3%	60 °C			
E3% Amb	3%	Ambiente			
E5%60°C	5%	60 °C			
E5% Amb	5%	Ambiente			

Fonte: Autor.

Watson e colaboradores ao avaliarem 290 artigos de cinco revistas de tribologia altamente conceituadas para o ano de 2017, observaram que o tamanho médio foi de uma amostra e que apenas 30% dos artigos apresentavam 3 ou mais repetições. Além disso, apenas 3,2% dos artigos exibiam alguma forma de randomização (WATSON *et al.*, 2019). Dessa forma, visando dar robustez aos resultados analisados e discutidos nesta tese, todos os experimentos foram

repetidos três vezes e as amostras foram retiradas de diferentes regiões de uma roda ferroviária e escolhidas de maneira aleatória.

### 3.4 TENSÃO RESIDUAL

Para a realização dos ensaios de tensão residual foi utilizado o equipamento PRISM, fabricado pelo grupo *Stresstech*, em detalhe na Figura 3.8. O equipamento utiliza o método perfuração com a técnica ESPI. Os ensaios foram realizados no laboratório Labenden, localizado no CPID, Cariacica – Espírito Santo.

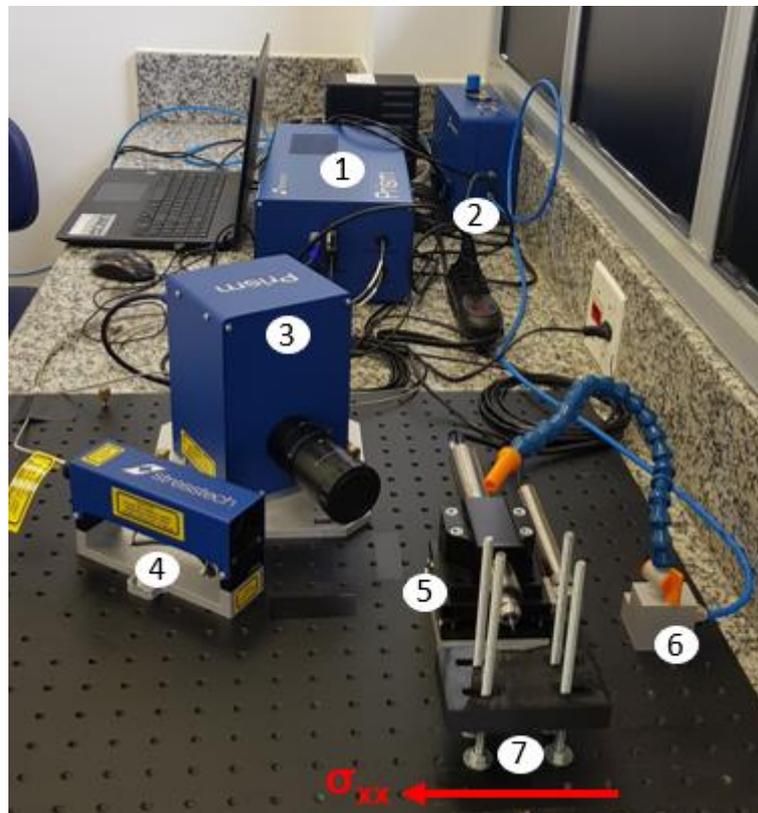


Figura 3.8- Componentes do equipamento PRISM. Em (01) caixa com fonte de laser, (02) o sistema pneumático, (03) cabeçote de vídeo, (04) cabeçote de iluminação, (05) furadeira pneumática, (06) jato de ar comprimido e em (07) porta amostra. Fonte Autor.

No fluxograma apresentado na Figura 3.9, são descritas as etapas necessárias para a realização do ensaio. As principais etapas são preparação da amostra, configurações pré-ensaio, o ensaio e a análise dos resultados.

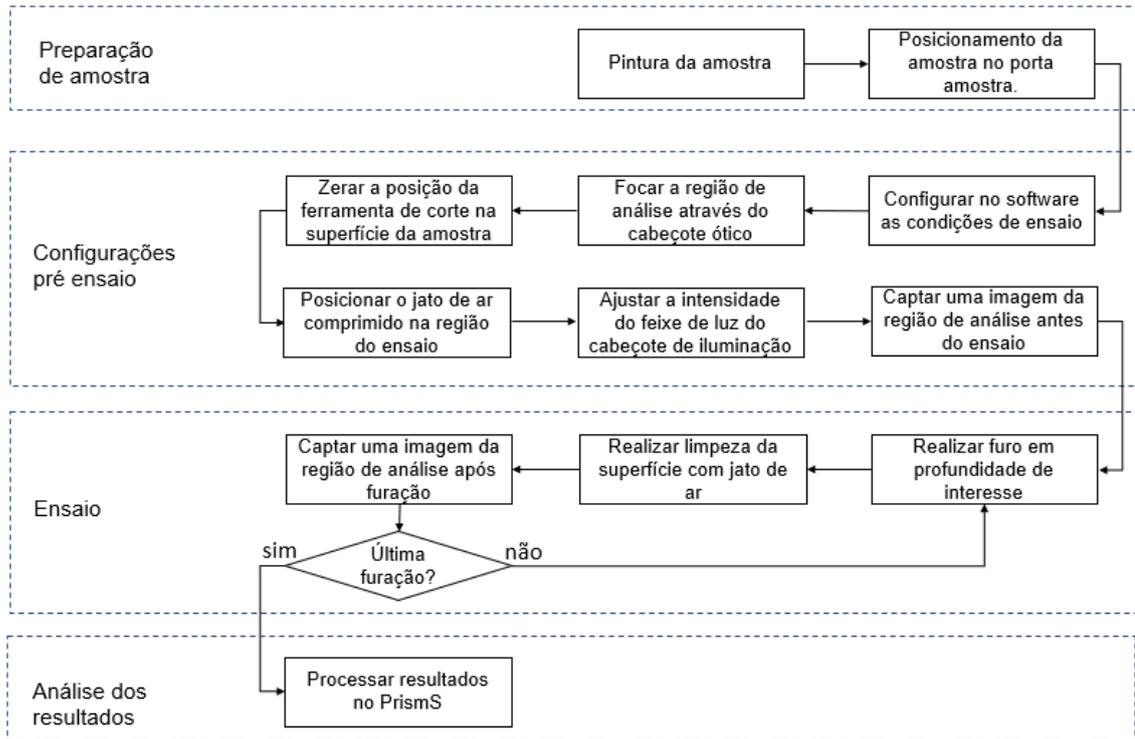


Figura 3.9 - Etapas para realização do ensaio de tensão residual. Fonte: Autor.

Na etapa de preparação de amostra, a região a ser analisada passa por uma etapa de pintura com uma fina camada de tinta branca fosca. O objetivo dessa etapa é reduzir a característica espelhada da superfície das amostras que impactam na qualidade dos *pixels* observados pelo cabeçote de vídeo. Para a fixação das amostras, um porta-amostra foi desenvolvido (figura 3.6 – item 7). O porta-amostra garante a fixação das amostras de maneira que a furação ocorra sempre no ponto de tensão máxima na pista de rolamento dos discos. Ademais, o posicionamento da amostra ocorreu de modo que as tensões residuais ( $\sigma_{xx}$ ) fornecidas pelo ensaio estivessem no mesmo plano em que ocorrem as forças tangenciais do ensaio disco-contra-disco.

Na etapa da configuração do ensaio, foram definidos o perfil de tensão residual a ser estudado e as condições de furação. Neste trabalho a tensão residual foi analisada em oito profundidades diferentes (25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350  $\mu\text{m}$ ). Para a furação, foi utilizada uma fresa de topo reto com dois cortes com revestimento de TiAlN (nitreto de titânio alumínio) e diâmetro de 0,8 mm. A velocidade de rotação utilizada foi de 25000 RPM.

Após a realização dos ensaios, as imagens foram analisadas no *software PrismS* e, a partir do cálculo utilizando o algoritmo desenvolvido pela *Stressteach*, forneceram-se os resultados

de tensão no plano xx ( $\sigma_{xx}$ ), tensão no plano yy ( $\sigma_{yy}$ ), tensão de cisalhamento ( $\tau_{xy}$ ) e as tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ .

Neste estudo, todas as condições estudadas no ensaio disco-contra-disco tiveram duas réplicas avaliadas no ensaio de tensão residual, e cada réplica foi analisada em duas regiões distintas para garantir boa representatividade das condições e robustez estatística na análise dos resultados. Adicionalmente, um par de amostra novas foi analisado para verificar a condição inicial de tensões e servir de referência para análises comparativas.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL E SUBSUPERFICIAL

Depois dos ensaios, os discos tiveram sua superfície e subsuperfície avaliadas utilizando Microscopia Ótica e MEV. A análise da superfície foi realizada com o objetivo de se identificarem características do mecanismo de desgaste atuante. Já a subsuperfície foi avaliada com o objetivo de se reconhecerem as características das trincas de fadiga de contato e a formação da zona deformada.

Para realizar análise na região subsuperficial, foi necessário realizar cortes na seção radial e longitudinal dos discos, sendo o corte longitudinal realizado na região central do disco, local onde encontram-se as máximas tensões, ver ilustração da Figura 3.10. Após o corte, as amostras foram embutidas em baquelite e passaram por uma preparação metalográfica igual à descrita no tópico 3.2.2.

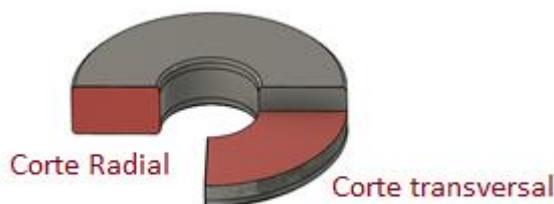


Figura 3.10 - Regiões analisadas nas amostras após o ensaio disco-contra-disco foram a região radial e a região transversal. Fonte: Autor

Nas análises de trinca, as principais características avaliadas na literatura são ângulo de trinca e profundidade (HU *et al.*, 2020a; MAYA-JOHNSON; FELIPE SANTA; TORO, 2017; REZENDE *et al.*, 2020a; SANTA *et al.*, 2019), mas também existem trabalhos que avaliam o comprimento de trinca (SCIAMMARELLA *et al.*, 2016; ZHOU *et al.*, 2020). Embora sejam

análises encontradas com frequência na literatura, observa-se pouca informação metodológica sobre o número de trincas caracterizadas ou até mesmo a densidade de trincas presentes.

Neste trabalho, todas as trincas presentes em aproximadamente um quarto do perímetro da amostra foram caracterizadas individualmente, registrando-se comprimento e profundidade de trinca, conforme descrito a seguir e mostrado na Figura 3.11. As trincas avaliadas foram as formadas na região central da pista de rolamento, local de maior pressão de contato.

- Comprimento de trinca: extensão da trinca do seu ponto início até o término de sua propagação;
- Profundidade de trinca: profundidade que a parte mais inferior da trinca se encontra em relação à superfície;
- Densidade de trinca: número de trinca por unidade de comprimento.

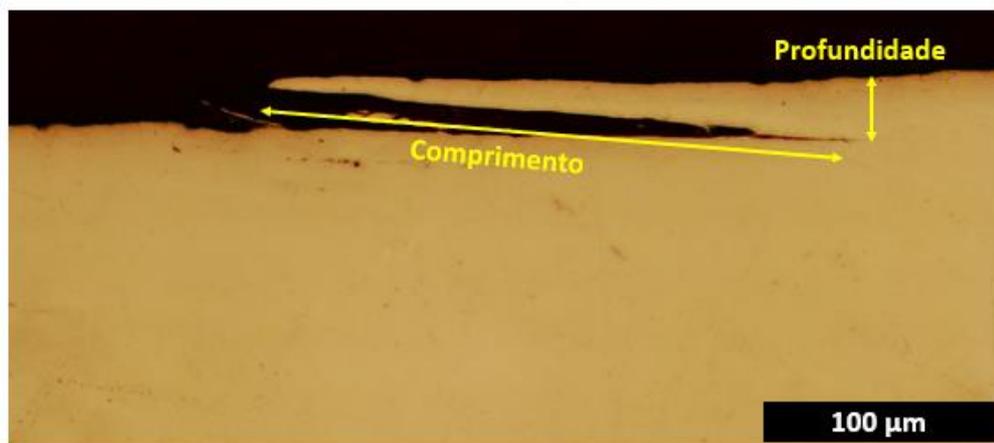


Figura 3.11- Características analisadas das trincas durante o estudo do comportamento da FCR. Fonte: Autor.

Posteriormente à caracterização, os dados foram tratados estatisticamente, aplicando teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* e construção de *boxplot*, permitindo uma maior compreensão sobre as características das trincas de fadiga de contato de rolamento.

### 3.6 PERFIL DE DUREZA

O perfil de dureza foi realizado utilizando um microdurômetro instrumentado da Anton Paar, modelo MCT<sup>3</sup>. O equipamento encontra-se disponível no CPID, no Espírito Santo. Na Figura 3.12, é apresentada uma fotografia com as características do equipamento.

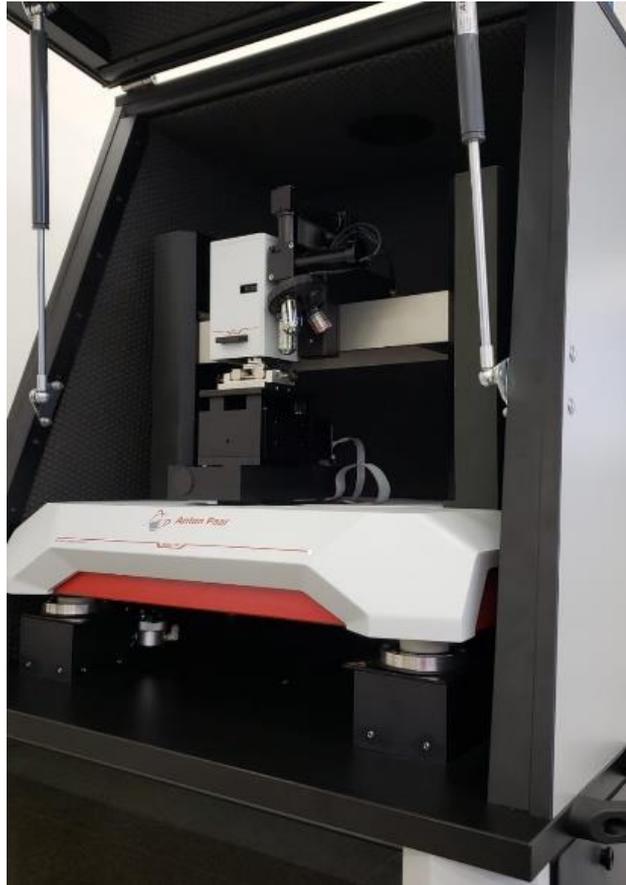


Figura 3.12- Microdurômetro instrumentado Anton Paar disponível no CPID. Fonte: Autor

Os ensaios foram realizados utilizando a metodologia desenvolvida por Oliver e Pharr (OLIVER; PHARR, 1992). Os testes foram conduzidos empregando uma taxa de carregamento de 1000 mN/min, seguida de uma aplicação de uma carga de 200 mN, com tempo de aplicação de 15 s e, por fim, uma taxa de descarregamento também de 1000 mN/min. A taxa de aquisição dos dados foi de 50 Hz.

As medidas foram realizadas na região onde ocorre maior pressão de contato, localizada no centro dos discos. O perfil de profundidade foi indentado a partir de 40  $\mu\text{m}$  da superfície com espaçamento entre medida de 40  $\mu\text{m}$  até uma profundidade de 200  $\mu\text{m}$ . A partir de 200  $\mu\text{m}$ , o

espaçamento entre medidas alterou-se para 50  $\mu\text{m}$  e o perfil de dureza estendeu-se até 500  $\mu\text{m}$ , região com dureza característica da dureza inicial dos discos ensaiados. Em razão da repetibilidade dos resultados e confiabilidade do equipamento, realizaram-se três indentações em cada profundidade.

### 3.7 ESPECTOMETRIA RAMAN

As análises de espectrometria Raman tiveram como objetivo caracterizar uma possível formação de óxido durante os ensaios no disco-contra-disco. Neste trabalho, utilizou um espectrômetro Raman confocal da marca Witec modelo Alpha 300, o equipamento que está disponível no LabPetro do CCE-UFES (termo de Cooperação nos. 0050.0022844.06.4).

O tempo de integração foi de 0,010 segundos e o de acumulação foi de 50 segundos. Os espectros foram excitados utilizando radiação de um laser verde de 532 nm. A região avaliada foi focada por uma lente de 50 X da marca Nikon.

Após aquisição, os espectros passaram por pré-processamento para ajuste da linha de base e remoção de *background* utilizando o *software* gratuito *crystalSleuth*. A caracterização dos espectros ocorreu comparando-se os dados experimentais com a base de dados RRUFF e dados da literatura.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 EFEITO DO ESCORREGAMENTO NAS CARACTERÍSTICAS TRIBOLÓGICAS DO AÇO CLASSE C PARA OS ENSAIOS REALIZADOS À TEMPERATURA AMBIENTE

Neste segmento do trabalho, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados à temperatura ambiente, a fim de compreender o efeito do escorregamento no coeficiente de atrito, no aumento da temperatura dos discos ao longo dos ensaios disco-contra-disco, na perda de massa, na tensão residual dos discos, nos mecanismos de desgaste, na camada deformada, dureza superficial e nas características das trincas de fadiga de contato.

#### 4.1.1 COEFICIENTE DE ATRITO

Os resultados do coeficiente de atrito (COT) em função do escorregamento para os ensaios realizados em temperatura ambiente são apresentados na Figura 4.1. Cada curva foi gerada pela média de todos os ensaios na mesma condição, e cada ponto plotado do gráfico é uma média de mil ciclos do ensaio.

Observa-se na região inicial, para todas as condições, uma variação muito grande do coeficiente de atrito, identificado pelo alto desvio padrão das medidas. Essa variação ocorre devido à acomodação das superfícies que passa por alterações de rugosidade superficial (LUCCIDI *et al.*, 2022). Essa região do gráfico é conhecida como *running-in*. Neste trabalho, a região de *running-in* corresponde, aproximadamente, aos 4 mil ciclos iniciais e está destacada no gráfico pela coloração rosa.

Sobre os ensaios, identifica-se uma relação direta do COT com o escorregamento. Com os ensaios conduzidos com 1% de escorregamento percebe-se o menor COT ao longo de todo o teste, enquanto, na condição com 5% de escorregamento, apresenta-se o maior COT.

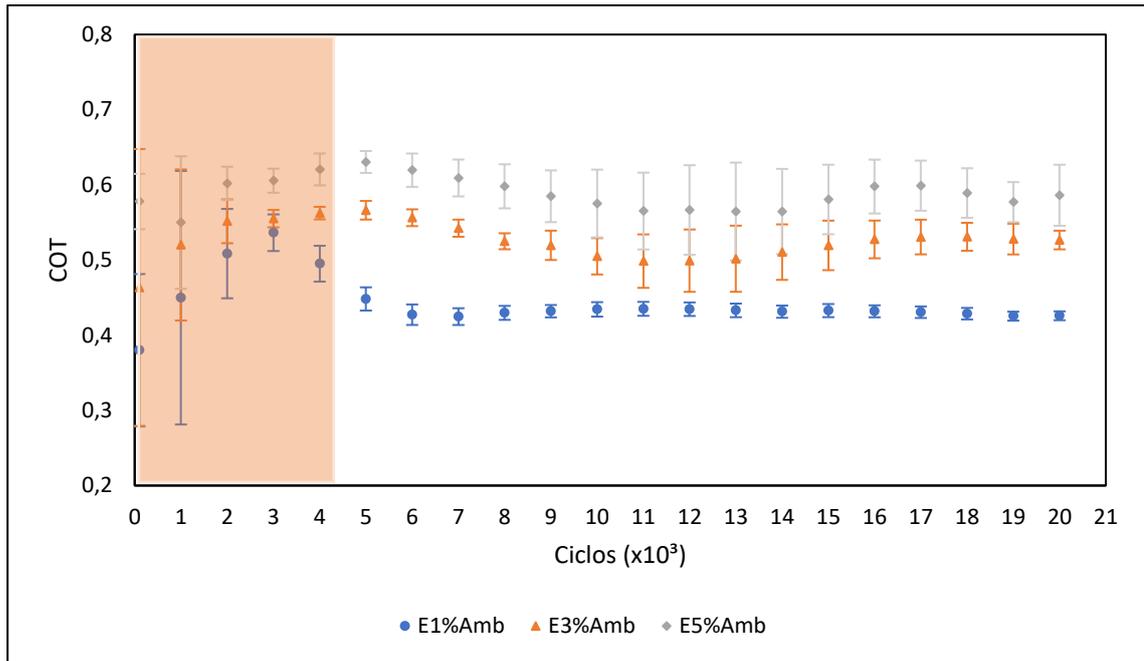


Figura 4.1 - Curva de coeficiente de atrito ao longo do ensaio para as condições com 1,3 e 5% de escorregamento realizados à temperatura ambiente. Fonte: Autor.

O aumento do COT em função do escorregamento pode ser explicado levando-se em consideração a região de contato entre os discos. É bem estabelecido que a região de contato entre os corpos, durante o ensaio disco-contra-disco, pode ser dividida em uma região de aderência e outra de deslizamento. Ocorre somente adesão no contato para ensaios realizados com 100% de rolamento. À medida que se aumenta o escorregamento entre os discos, surge uma região de deslizamento nesse contato, e ela aumentará até que exista 100% de deslizamento no contato, levando o COT à saturação (CARTER, 1926).

Um valor global de COT foi definido para cada condição de ensaio. Para isso, foi realizada uma média do COT da região de 4 a 20 mil ciclos. Esse valor é apresentado na Figura 4.2. Nas curvas, chama a atenção a ausência de um patamar de saturação do COT para os ensaios realizados com escorregamento acima de 3%, uma vez que os trabalhos que utilizam o ensaio disco-contra-disco apontam para a saturação do COT em aproximadamente 2% de escorregamento, ou seja, acima desse valor de escorregamento o COT permanece inalterado (LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004; ZHU *et al.*, 2018).

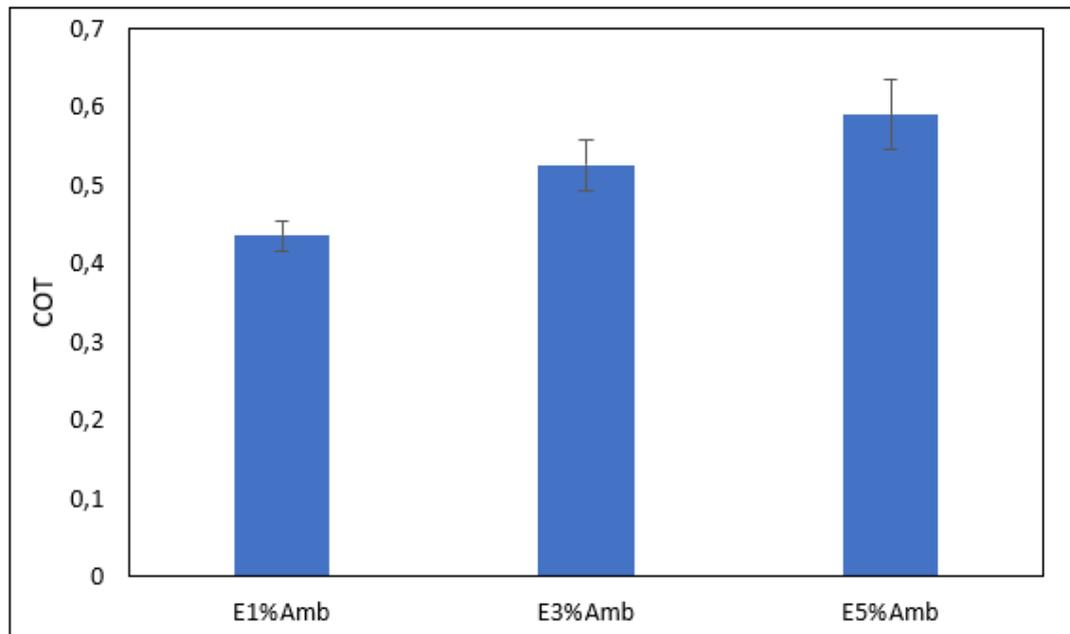


Figura 4.2- Coeficiente de atrito global em função do escorregamento para os ensaios realizados a temperatura ambiente. Fonte: Autor

Na Figura 4.3, é apresentada a curva de Carter para os ensaios realizados a temperatura ambiente plotado com alguns dados da literatura. É evidenciado que todos os ensaios conduzidos pelos autores apresentados na Figura 4.3 já possuem um estado de saturação de COT para ensaios superiores a 2% de escorregamento, o que aparentemente mostra uma divergência desse trabalho com os resultados encontrados na literatura.

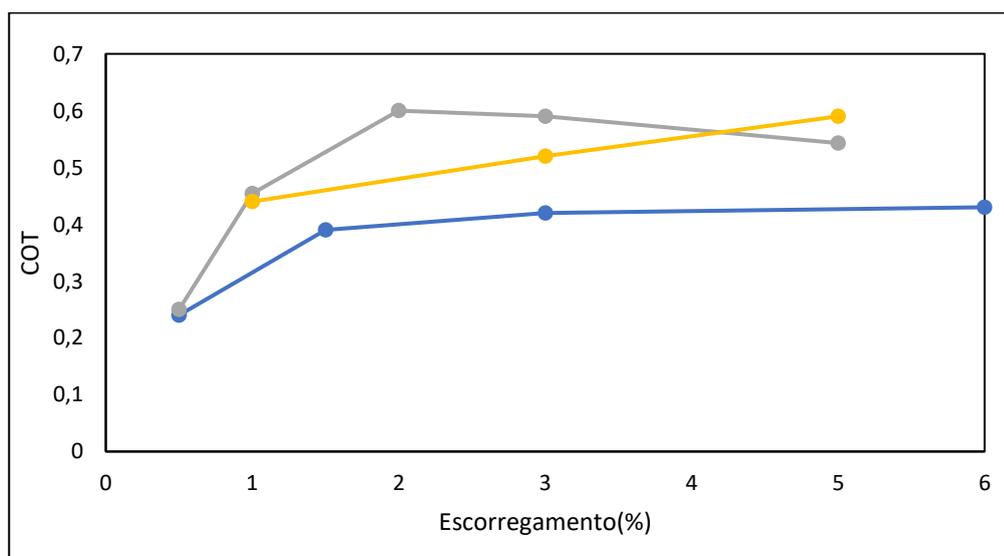


Figura 4.3 – Comparativo da curva de COT em função do escorregamento com os trabalhos de Zhu e colaboradores (2018) e Gallardo-Hernandez e colaboradores (2006). Fonte: Autor.

Entretanto, ressalta-se que avaliar a saturação do contato por meio do escorregamento pode não ser a melhor opção, porque, como visto na equação 3.2, o cálculo do escorregamento leva em consideração apenas a diferença de velocidade entre os discos, desconsiderando o fato que os ensaios podem ser realizados em diferentes velocidades, além da possibilidade de possuir diferentes geometrias de disco. Uma forma de eliminar a influência dessas variáveis é adotar a velocidade de escorregamento (m/s) em vez de escorregamento relativo entre os discos.

De posse das informações de velocidade do ensaio e a geometria dos discos dos trabalhos analisados, a velocidade de escorregamento foi calculada e um novo gráfico plotado, mostrado na Figura 4.4. Nota-se que todos os trabalhos apresentam um COT crescente até a velocidade de escorregamento de 0,02 m/s para somente depois atingir a saturação do COT. Nessa abordagem, os resultados encontrados, neste trabalho, demonstram boa concordância com a literatura. Quanto aos patamares distintos de COT entre os autores, isso pode ter ocorrido por características superficiais distintas entre os pares tribológicos estudados, como rugosidade, tipo de contato e outros fatores (CHEN *et al.*, 2016a).

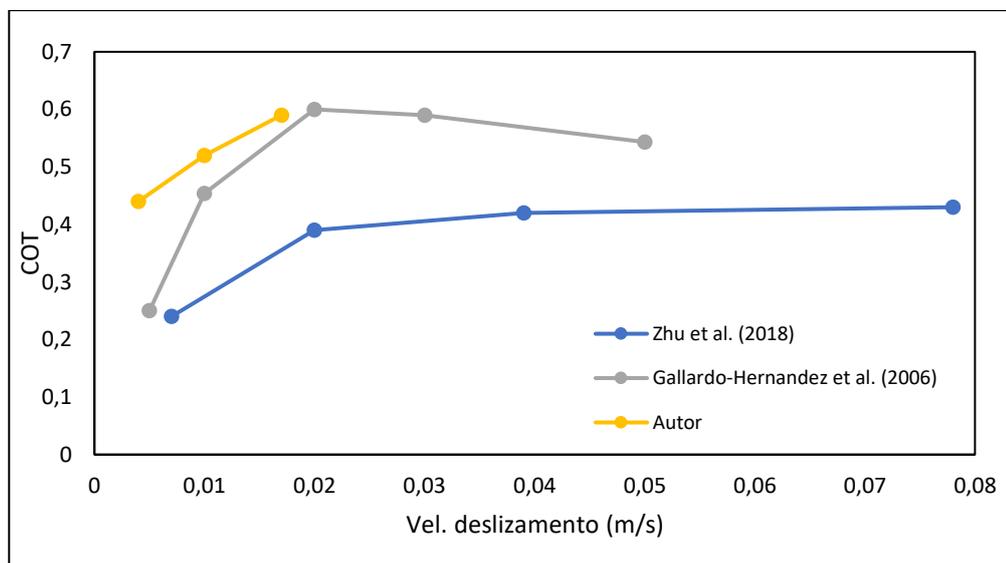


Figura 4.4 – Comparação da curva de COT em função da velocidade de escorregamento com os trabalhos de Rodriguez-Arana e colaboradores (2022), Zhu e colaboradores (2018) e Gallardo-Hernandez e colaboradores (2006). Fonte: Autor.

#### 4.1.2 EFEITO DO ESCORREGAMENTO NO AUMENTO DE TEMPERATURA

Durante o ensaio disco-contra-disco realizado à temperatura ambiente, nota-se que a temperatura dos discos não permanece constante ao longo do ensaio (GALLARDO-HERNANDEZ; LEWIS; DWYER-JOYCE, 2006). Na Figura 4.5, é apresentado o comportamento típico de aumento de temperatura ao longo de um ensaio que foi observado nas condições de 1, 3 e 5% de escorregamento. Esse aumento da temperatura ocorre em função do calor gerado pelo atrito entre os discos.

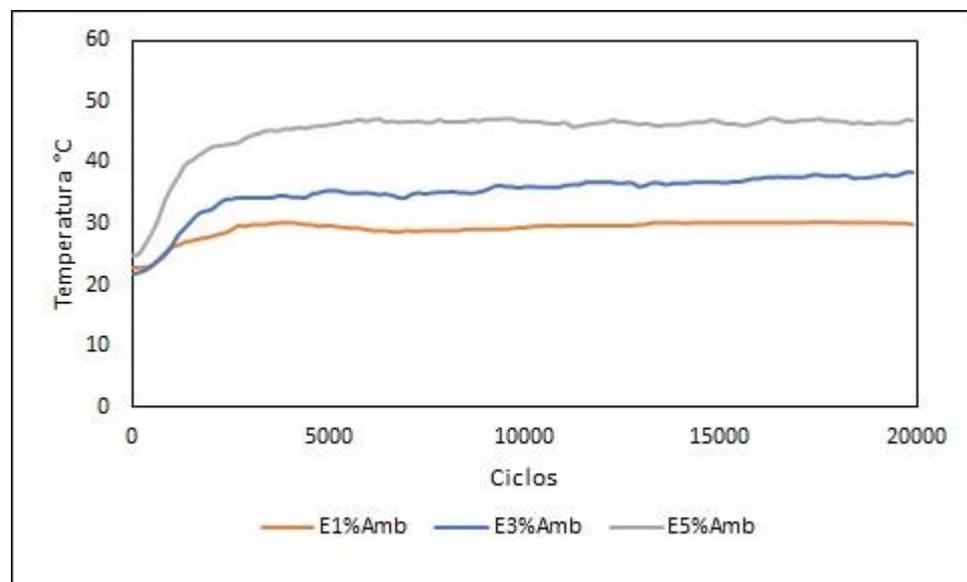


Figura 4.5 - Efeito do escorregamento no aumento de temperatura do ensaio disco-contra-disco para as condições com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

Como constatado na Figura 4.5, a temperatura dos discos aumenta com o aumento do escorregamento. Para tribômetros nos quais se tem 100% de escorregamento no contato entre os corpos, como pino disco, Bhushan (2000) descreve que a fonte de calor proveniente do atrito é função do coeficiente de atrito, da carga normal e da velocidade de escorregamento entre os corpos. Os resultados obtidos, neste estudo, mostram que o escorregamento governa o aumento de temperatura para os ensaios que ocorrem à temperatura ambiente no ensaio disco-contra-disco.

Na Figura 4.6, são ilustrados os resultados deste trabalho comparados com alguns dos retratados na literatura. Os pontos experimentais se ajustam com uma linha de tendência linear,

com o valor de  $R^2$  sendo 0,98. Isso evidencia a correlação direta entre escorregamento e temperatura.

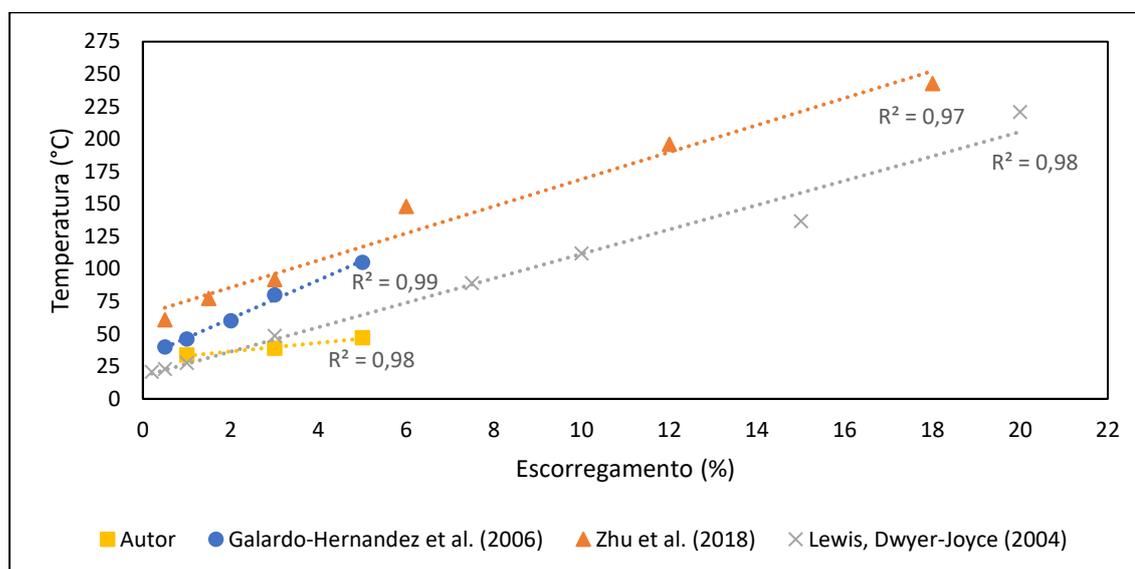


Figura 4.6 - Comparação do efeito do escorregamento na temperatura do ensaio para os experimentos realizados na temperatura ambiente deste trabalho com os trabalhos de Zhu e colaboradores (2018), Galardo-Hernandez e colaboradores (2006) e Lewis, Dwyer – Joyce (2004). Fonte: Autor.

Os autores apresentados na Figura 4.6 realizaram os ensaios em diferentes condições de pressão de contato, de velocidade de rotação dos discos e aços. No trabalho de Gallardo-Hernandez *et al.* (2006) e Lewis e Dwyer-Joyce (2004), os ensaios foram conduzidos a uma pressão de contato de 1500 MPa e rotação dos discos de 400 RPM utilizando um aço de roda perlítico R8T (GALLARDO-HERNANDEZ; LEWIS; DWYER-JOYCE, 2006; LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004). Já no trabalho de Zhu e colaboradores (2018), a mesma pressão de contato foi utilizada, mas com velocidade de rotação dos discos de 625 RPM utilizando também aço perlítico, o CL60 e o AAR classe D (ZHU *et al.*, 2018). As diferentes condições nos quais esses ensaios foram conduzidos reafirmam a predominância do escorregamento (velocidade de escorregamento) como fator principal na elevação da temperatura.

Além do exposto, chama-se a atenção para o impacto desse resultado nos ensaios disco-contra-disco. Em termos práticos, significa que cada condição de ensaio é realizado em uma temperatura diferente, sendo somado uma nova variável (temperatura) para qualquer estudo que envolva avaliar o efeito no escorregamento nos ensaios disco-contra-disco. Dessa forma, os ensaios planejados, nesta tese, com controle de temperatura eliminam o efeito da temperatura, permitindo avaliar todas as condições de escorregamento com a mesma temperatura.

### 4.1.3 TAXA DE DESGASTE

Na literatura, são encontradas diversas formas de analisar o desgaste dos componentes ferroviários após ensaios no disco-contra-disco. Alguns autores preferem apresentar seus resultados levando em consideração aspectos temporais, como perda de massa por ciclos (CHRISTOFOROU; FLETCHER; LEWIS, 2019; MAYA-JOHNSON; FELIPE SANTA; TORO, 2017). Outra maneira muito usual é a apresentação da relação entre perda de massa e as condições de contato, como velocidade de escorregamento ou escorregamento em si.

Neste trabalho, optou-se por apresentar os resultados de perda de massa total em função do escorregamento. Assim, na Figura 4.7 é apresentado o resultado de perda de massa para os ensaios realizados à temperatura ambiente.

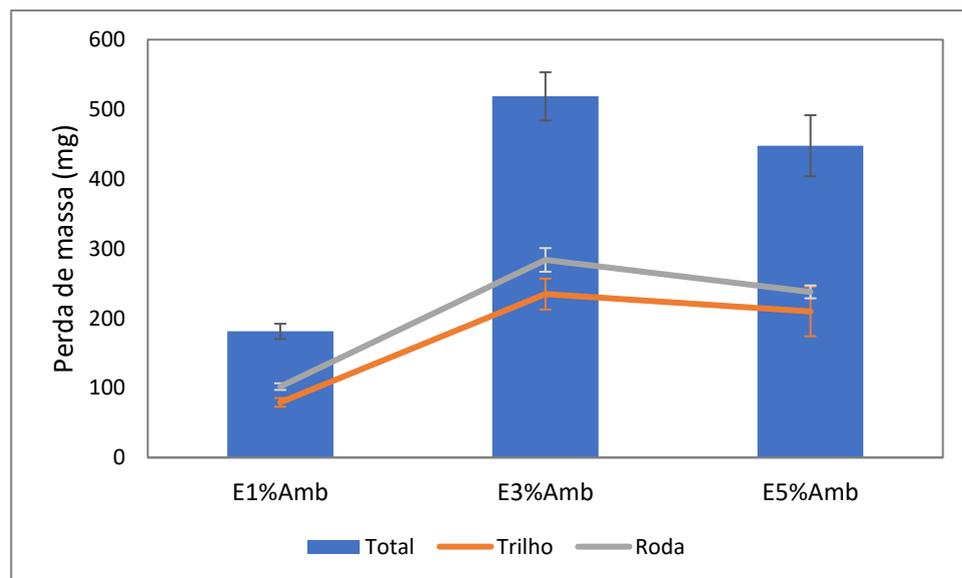


Figura 4.7 - Perda de massa em função do escorregamento para os ensaios à temperatura ambiente. Fonte: Autor.

A análise da Figura 4.7 permite identificar a dependência da perda de massa em função do escorregamento. Existem dois comportamentos para a perda de massa. O primeiro deles ocorre para os ensaios executados com 1% de escorregamento, e o segundo para aqueles ensaios de 3 e 5% de escorregamento. Esses resultados apontam para uma mudança do regime de desgaste que ocorre entre 1 e 3% de escorregamento.

Esse aumento do desgaste dos discos em função do aumento do escorregamento está associado aos mecanismos de desgastes atuantes em cada condição analisada. Comumente é

observada, em baixos escorregamentos, a predominância de mecanismos triboquímicos e *ratchetting* e com o aumento do escorregamento novos mecanismos passam a ser predominantes, como abrasivo e adesivo (MA *et al.*, 2016; MIRANDA *et al.*, 2022; REZENDE *et al.*, 2020a; WANG *et al.*, 2017; ZHOU *et al.*, 2016b). Nas seções 4.5.1 e 4.5.2 serão apresentados os principais mecanismos atuantes trazendo uma melhor compressão do aumento da perda de massa em função do escorregamento e quanto aos patamares observados na Figura 4.7.

Sobre os discos, observa-se uma perda de massa maior nos discos Roda do que nos discos Trilho, tal comportamento já foi observado por outros autores. Wang e colaboradores (2014b) ao avaliarem 4 materiais de rodas, observaram maior desgaste no disco da roda para todas as configurações experimentais avaliadas (WANG *et al.*, 2014b). Santa e colaboradores (2019) verificaram uma taxa de desgaste para a amostra de roda de cerca de uma ordem de magnitude maior do que para a amostra de trilho para uma ampla faixa de valores de escorregamento (SANTA *et al.*, 2019). Diversos outros trabalhos confirmaram esse comportamento e atribuíram esse fenômeno ao efeito da microestrutura da roda que apresenta quantidade de ferrita maior do que o trilho (HUA *et al.*, 2022; LEWIS *et al.*, 2019; RODRÍGUEZ-ARANA *et al.*, 2022; ZHOU *et al.*, 2016, 2021).

Como neste trabalho ambos os discos possuem mesma microestrutura e dureza inicial, acredita-se que outros fatores além da microestrutura possam estar influenciando no comportamento de desgaste do par roda/trilho, como a dinâmica do contato.

Embora apresentar a perda de massa em função do escorregamento seja importante para o uso prático dos resultados, a relação de escorregamento considera apenas a velocidade relativa dos corpos de prova que representam a roda e o trilho, não considerando a força de contato e a área de contato (OLOFSSON; TELLISKIVI, 2003). Desse modo, para eliminar o efeito da geometria de disco, do tipo de contato e da carga normal, os dados de taxa de desgaste (perda de massa por distância deslizada por área de contato) são apresentados em função da  $(T\gamma/A)$ , em que  $T$  é a força de tração,  $\gamma$  é a relação de escorregamento e  $A$  é a área de contato, conforme Figura 4.8. Essa abordagem foi proposta por Bolton e Clayton (1984) e avalia a perda de massa em função da energia do contato.

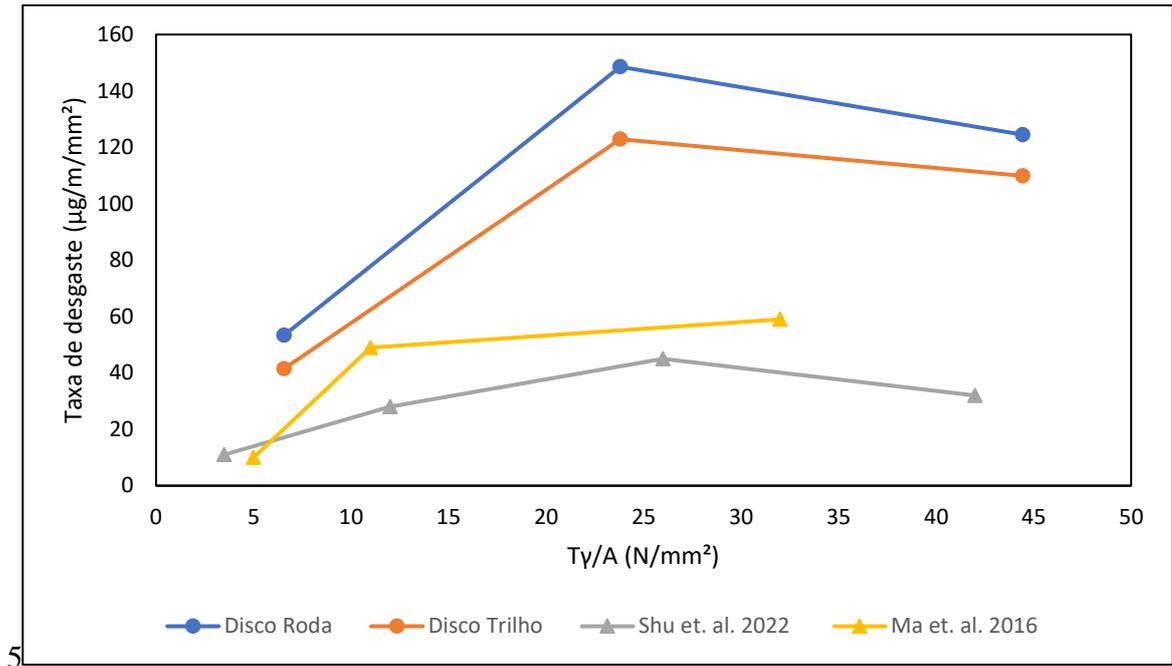


Figura 4.8 - Perda de massa total em função de  $T\gamma/A$  para os ensaios realizados na temperatura ambiente deste trabalho comparado como perda de massa em ensaio realizado por Shu e colaboradores (2022) utilizando aços de roda perlítico CL65 e o trabalho de Ma e colaboradores (2016) que utilizaram o aço ER8. Fonte: Autor.

A análise da figura 4.8 permite comparar os resultados encontrados neste trabalho com alguns dados da literatura. Ambos os trabalhos comparados utilizam aço perlítico, mesma microestrutura do aço adotada neste trabalho. Shu e colaboradores utilizaram um aço de roda CL 65 enquanto Ma e colaboradores utilizaram um aço ER8. Estes informam também que os experimentos foram conduzidos com a temperatura variando entre 16 – 22 °C, entretanto essa informação não está disponível no trabalho de Shu e colaboradores (MA *et al.*, 2016; SHU *et al.*, 2022a).

A maior taxa de desgaste observada neste trabalho, quando comparado com os trabalhos publicados na literatura pode estar relacionada a influência dos debrís no contato, uma vez que muitos dos trabalhos publicados dentro desta temática fazem a remoção do debri com jatos de ar, o que conduz à menor taxa de desgaste do tribossistema (LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004).

#### 4.1.4 TENSÃO RESIDUAL

##### 4.1.4.1 Estado de tensões residuais antes do ensaio

O estado de tensão residual do disco que representa a roda ferroviária antes de iniciar os ensaios disco-contra-disco é apresentado na Figura 4.9. No gráfico em questão, é apresentada a tensão residual na direção da pista de rolamento, denominada ( $\sigma_x$ ), a tensão perpendicular à pista de rolamento ( $\sigma_y$ ) e a tensão de cisalhamento entre os planos ( $\tau_{xy}$ ). De maneira geral, pode-se observar que, nas regiões mais próximas à superfície, existe uma leve tensão residual compressiva. A 25 micrômetros da superfície, a tensão residual  $\sigma_x$  está em torno  $-134 \pm 5$  MPa. Já a tensão residual  $\sigma_y$ , na mesma profundidade, encontra-se também compressiva de  $-103 \pm 20$  MPa.

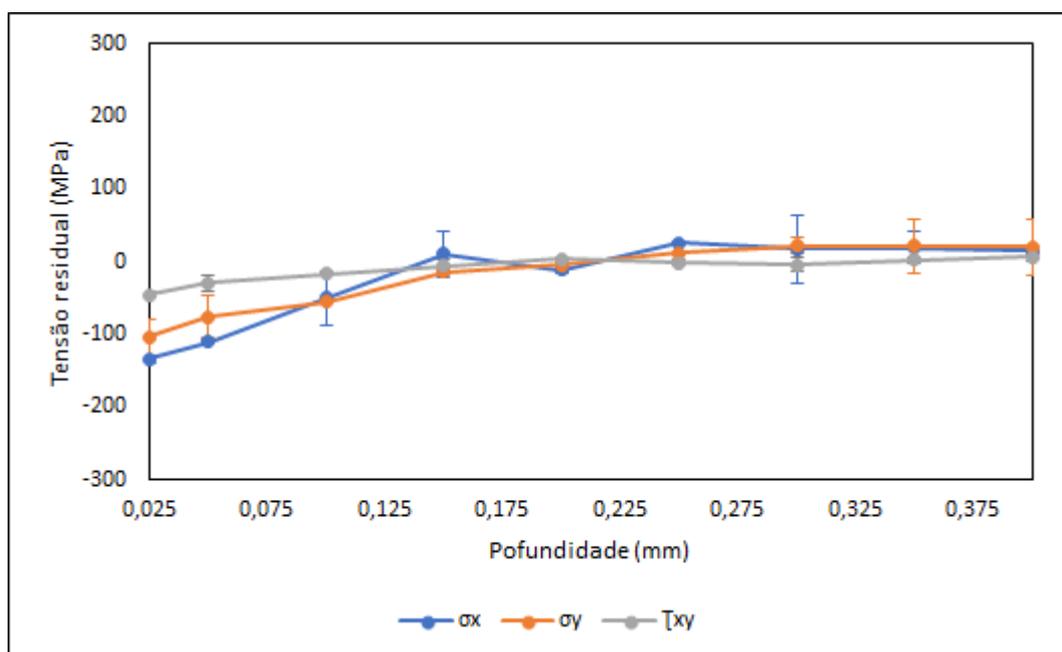


Figura 4.9 - Distribuição da tensão residual em função da profundidade dos discos Roda antes de realizar o ensaio disco-contra-disco.  $\sigma_x$  = tensão residual na direção da pista de rolamento,  $\sigma_y$  = tensão residual perpendicular a pista de rolamento,  $\tau_{xy}$  = tensão de cisalhamento entre os planos xy. Fonte: Autor.

Como a tensão de cisalhamento é muito próxima a zero em todas as medidas, as tensões residuais principais apresentam o mesmo comportamento das tensões residuais  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ . Neste trabalho, todas as discussões que seguirão serão relacionadas à tensão  $\sigma_x$ , que é a que ocorre ao

longo da pista de rolamento dos ensaios disco-contra-disco. Na Figura 4.10, é apresentada a tensão residual do disco Roda e do disco Trilho antes do ensaio.

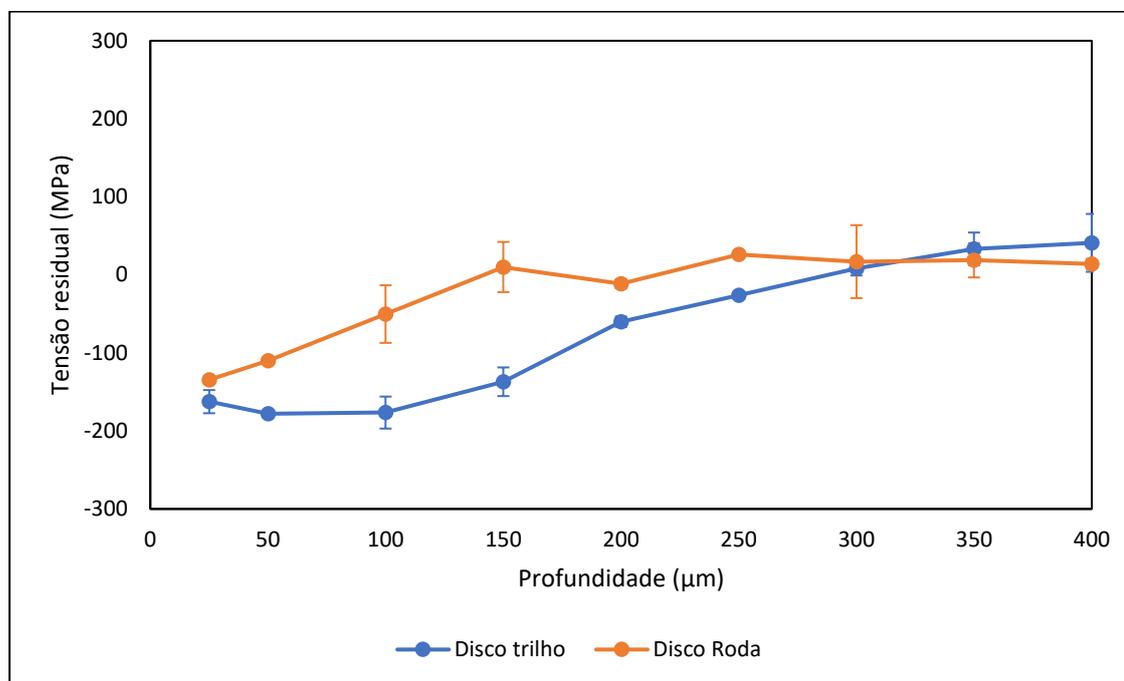


Figura 4.10 - Distribuição da tensão residual medida em diferentes profundidades em relação à pista de rolamento dos discos Roda e Trilho antes de realizar o ensaio disco-contra-disco. Fonte: Autor.

A presença da tensão residual compressiva nas regiões próximas à superfície dos discos pode ser proveniente do processo de usinagem que foi empregado na fabricação dos discos e também do processo de lixamento utilizado para o controle de rugosidade superficial dos discos. No trabalho de Dumas e colaboradores (2021), eles desenvolveram um novo modelo para prever campos de tensões residuais induzidos por uma operação de torneamento, e nos estudos encontraram tensões residuais compressivas em regiões subsuperficiais do material torneado (DUMAS *et al.*, 2021).

Ao comparar o comportamento dos discos que representam o trilho e a roda, percebe-se uma maior tensão residual compressiva no disco Trilho. Um motivo possível é que a fabricação do disco do trilho possui um processo de usinagem com mais etapas, a etapa de geração do raio superficial, conforme indicado na Figura 3.6. No trabalho de Ishida e Abe (1996), observou-se uma tensão compressiva dos discos de 50 MPa antes de realizarem os ensaios. Os autores atribuíram esse valor ao processo de fabricação dos discos (ISHIDA; ABE, 1996). Seo e colaboradores (2022) também iniciaram o ensaio disco-contra-disco com uma tensão residual compressiva de 50 MPa (SEO; HUR; KWON, 2022).

#### 4.1.4.2 Estado de tensão residual após o ensaio disco-contra-disco

Na Figura 4.11, é apresentado o gráfico de tensão residual em função da profundidade da superfície dos discos que representam a roda para todas as condições de escorregamento ensaiadas à temperatura ambiente.

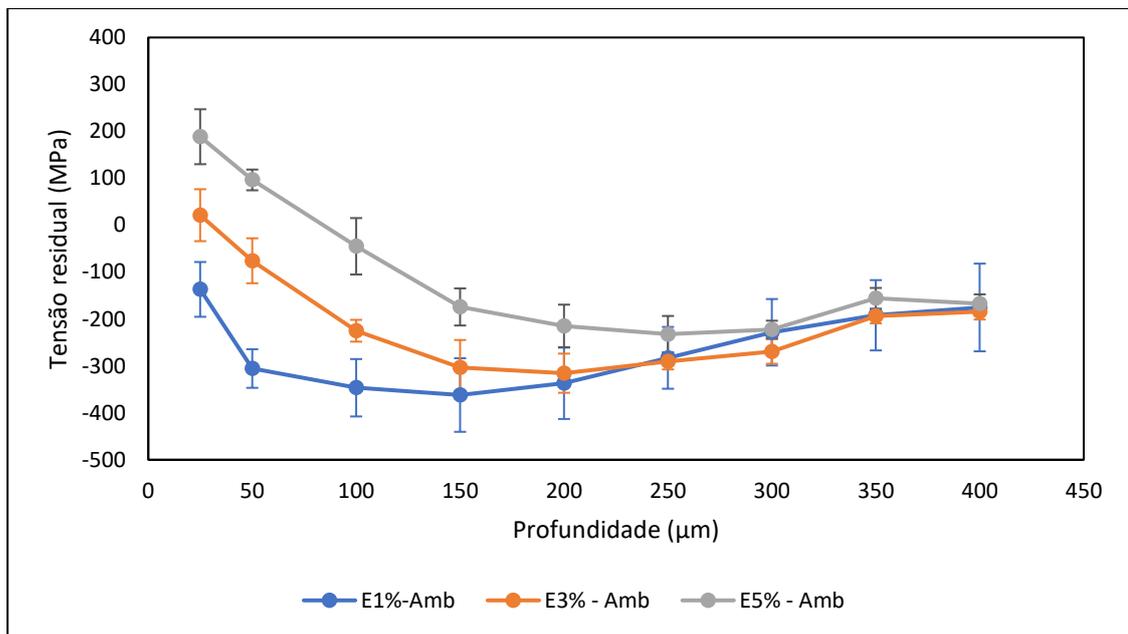


Figura 4.11 - Tensão residual para os discos Roda, em diferentes profundidades, após os ensaios realizados à temperatura ambiente com 1,3 e 5% de escorregamentos. Fonte: Autor.

Ao analisar o gráfico, verifica-se a influência direta do escorregamento na geração e/ou reversão das tensões residuais para o disco Roda. Para 1% de escorregamento, a tensão residual na região mais próxima à superfície é do tipo compressiva e possui magnitude estatisticamente igual à do disco antes de iniciar os ensaios. Entretanto, diferentemente do que ocorre antes do ensaio, percebe-se um incremento de tensão residual compressiva até atingir seu máximo a aproximadamente 150 μm de profundidade da superfície.

Por sua vez, nos ensaios realizados com 3 e 5% de escorregamento, observa-se uma inversão nas tensões residuais, que passam a ser trativas nas regiões mais próximas da superfície. Como notado nos ensaios com 1% de escorregamento, identificou-se também um incremento das tensões compressivas em função da profundidade até atingirem seu máximo em

aproximadamente 200 e 250  $\mu\text{m}$  para os ensaios com 3 e 5% de escorregamento, respectivamente.

Essa inversão das tensões residuais podem contribuir para o aumento da perda de massa identificada na seção 4.4, pois a presença da tensão residual compressiva é conhecida por suprimir aberturas de trincas e, conseqüentemente, reduzir o desprendimento de material da zona de contato (SEO *et al.*, 2008). Nessa perspectiva, pode-se sugerir que a inversão das tensões residuais de compressivas para trativas contribuem para a mudança de regime de desgaste.

A influência do ensaio no campo das tensões residuais parece ocorrer até uma profundidade de 250 – 300  $\mu\text{m}$  da superfície, porque, nessa região, as três curvas se igualam estatisticamente. Quanto à localização da máxima tensão compressiva, parece existir uma relação entre a extensão da camada deformada, que será analisada e discutida na seção 4.7.1, e as tensões máximas compressivas, resultado que vai ao encontro da literatura. Ishida e Abe afirmam que as tensões residuais evoluem conforme o processo de encruamento de material até a sua exaustão plástica (ISHIDA; ABE, 1996).

Ainda sobre o incremento de tensão residual em função do escorregamento, constata-se pelo gráfico da Figura 4.12, uma relação linear da tensão residual em função do escorregamento para as medidas mais próximas à superfície.

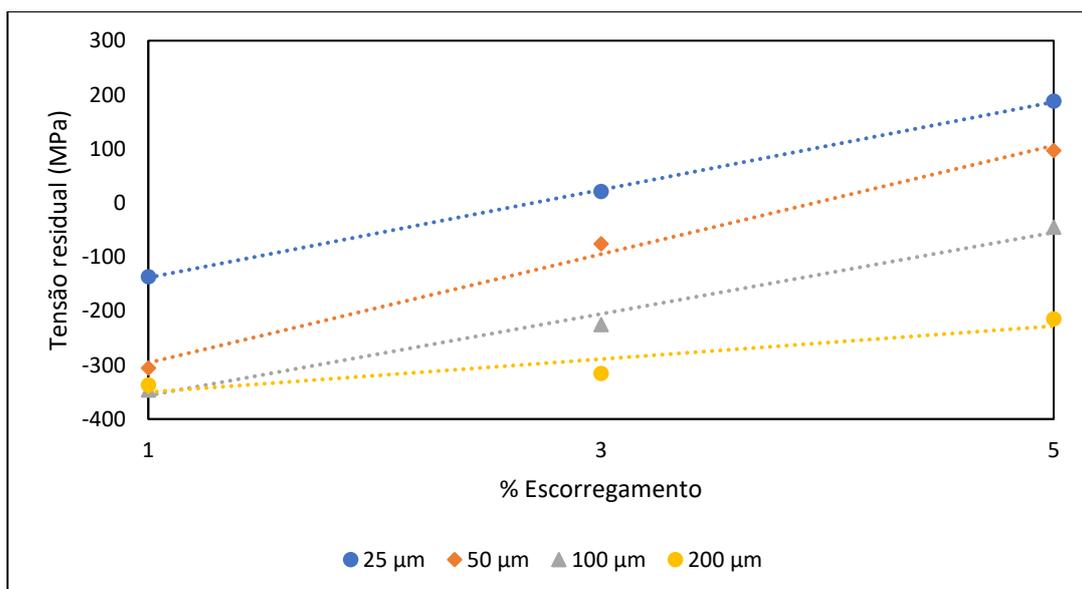


Figura 4.12 - Linearidade da tensão residual com o escorregamento observados em diferentes profundidades dos discos Roda para os ensaios conduzidos a temperatura ambiente. Fonte: Autor.

Os valores da equação de reta gerada pela linha de tendência linear e o  $R^2$  do ajuste dos pontos dessa equação são apresentados, a seguir, na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Equação que correlaciona tensão residual ( $\sigma_{res}$ ) com escorregamento (ESC).

Profundidade	Equação	$R^2$
25 $\mu\text{m}$	$\sigma_{res} = 81,2 \times \text{ESC} - 219,5$	0,99
50 $\mu\text{m}$	$\sigma_{res} = 100,5 \times \text{ESC} - 396,4$	0,99
100 $\mu\text{m}$	$\sigma_{res} = 75,4 \times \text{ESC} - 431$	0,99
200 $\mu\text{m}$	$\sigma_{res} = 30,5 \times \text{ESC} - 380,8$	0,87

Fonte: Autor.

A influência do escorregamento na tensão residual pode ser mais bem compreendida ao avaliar as forças que atuam no contato. Durante o ensaio disco-contra-disco, atua sobre os discos a força normal, causada pela carga aplicada durante o ensaio para simular as pressões de contato. Com o movimento dos discos, também passa a atuar no contato também uma força tangencial que varia com o escorregamento (LEWIS; OLOFSSON, 2009). Dessa forma, durante os ensaios atuam simultaneamente uma força normal e tangencial sobre os discos.

Para os ensaios com 1% de escorregamento, devido ao baixo valor do COT (ver seção 4.2), a força tangencial é a mais baixa entre os experimentos realizados, o que pode explicar o fato de haver pouca mudança na tensão residual quando comparado com os discos novos. No entanto, com o aumento do escorregamento, ocorre um aumento de força tangencial. Esse incremento favorece o aumento das tensões residuais, ocasionando a uma inversão das tensões residuais de compressivas para trativas para os ensaios com 3 e 5% de escorregamento.

Soma-se, ainda, o efeito das tensões de cisalhamento atuantes no contato. Nas condições de baixo escorregamento, as tensões de cisalhamento máximo encontram-se na região de subsuperfície dos discos. À medida que se aumenta o escorregamento, as tensões de cisalhamento máximo se encontram na superfície dos discos (EKBERG; KABO; ANDERSSON, 2002).

Seo e colaboradores (2022) ao estudarem sobre o efeito das propriedades mecânicas do trilho e da roda no desgaste e fadiga de contato de rolamento, encontraram uma relação linear entre a tensão residual gerada durante o ensaio disco-contra-disco com a tensão de cisalhamento máximo do material de trilho, como pode ser observada na equação 4.1

$$\sigma_{res.} = -0,45\tau_{m \ a \ x} - 96,85 \quad \text{eq. 4.1}$$

No qual  $\sigma_{res.}$  e  $\tau_{m \ a \ x}$  são a tensão residual e a tensão de cisalhamento máxima do material, respectivamente. Contudo, o modelo proposto pelos autores foi desenvolvido para situações de baixo escorregamento, sem que ocorra a saturação no contato. O modelo também não prever uma reversão de tensão residual na superfície dos materiais.

Ekberg e colaboradores (2002), ao estudarem um modelo para previsão de fadiga de contato de rolamento de rodas ferroviárias, descreveram a tensão de cisalhamento máxima ( $\tau_{m \ a \ x}$ ) dos componentes ferroviários em função da pressão de contato máxima ( $P_0$ ) e o coeficiente de atrito ( $\mu$ ), conforme equação 4.2 (EKBERG; KABO; ANDERSSON, 2002).

$$\tau_{m \ a \ x} = \mu P_0 \quad \text{eq. 4.2}$$

Aplicando a equação de cisalhamento descrita por Ekberg e colaboradores (2002) aos resultados obtidos nesta tese para os ensaios de tensão residual dos discos Roda, constatou-se uma correlação linear entre a tensão de cisalhamento máxima e tensão residual, tal qual observado no trabalho de Seo e colaboradores (2022), conforme pode ser observado na Figura 4.13. Para a elaboração do gráfico, foram considerados dois discos para cada condição de escorregamento.

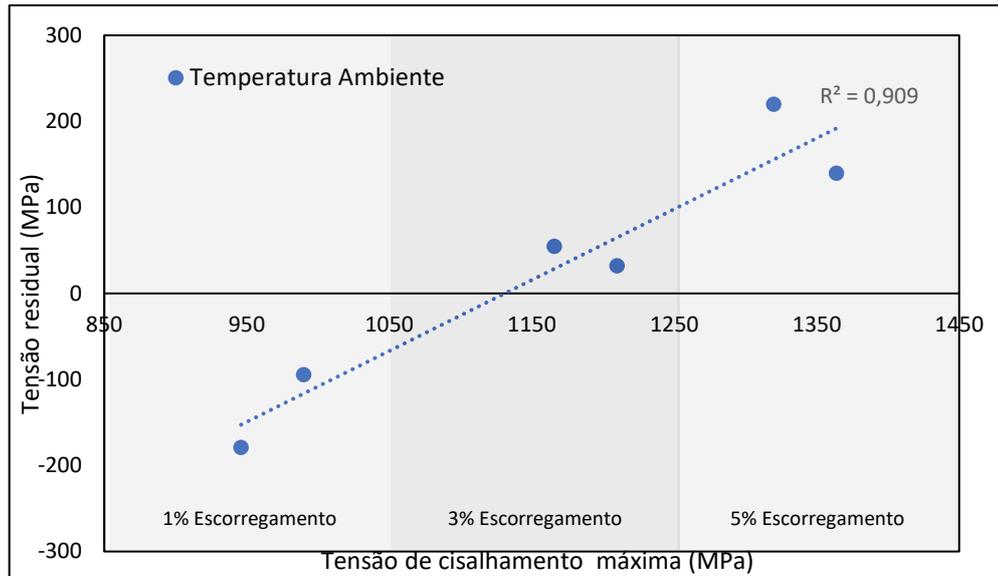


Figura 4.13 - Relação entre tensão de cisalhamento máxima e tensão residual mensurada a 25  $\mu\text{m}$  da superfície do disco Roda. Fonte: Autor.

Todavia, foram exploradas, neste trabalho, condições de escorregamento que permitiram observar a reversão da tensão residual em função do aumento da tensão de cisalhamento. Nesse sentido, propõe-se um novo modelo matemático, o qual descreve o efeito da tensão de cisalhamento do disco Roda, independente do escorregamento na tensão residual, conforme pode ser observado na Eq. 4.3.

$$\sigma_{\text{res.}} = 0,82\tau_{\text{máx}} - 932,63 \quad \text{eq. 4.3}$$

Diante da dificuldade de se realizarem ensaios de tensão residual nos laboratórios, em virtude das indisponibilidades de equipamentos ou por causa de usos de técnicas complexas que envolvem muito tempo para obtenção do resultado, a equação obtida pode ser uma importante ferramenta para estimar de maneira rápida a tensão residual após ensaio disco-contra-disco dos componentes ferroviários, uma vez que a equação depende de duas variáveis que são facilmente obtidas no ensaio disco-contra-disco, que é coeficiente de atrito e pressão máxima de contato.

Na Figura 4.14, são apresentados os dados da tensão residual dos discos Trilho para os ensaios realizados à temperatura ambiente. Identifica-se que a tensão residual nas regiões próximas à superfície é igualada pelo desvio padrão, embora a curva de 1% de escorregamento se mantenha menor do que as curvas de 3 e 5%, em todas as medidas realizadas. Ressalta-se, que diferentemente do observado nos discos que representam a roda, em nenhuma condição houve a reversão das tensões residuais para trativas.

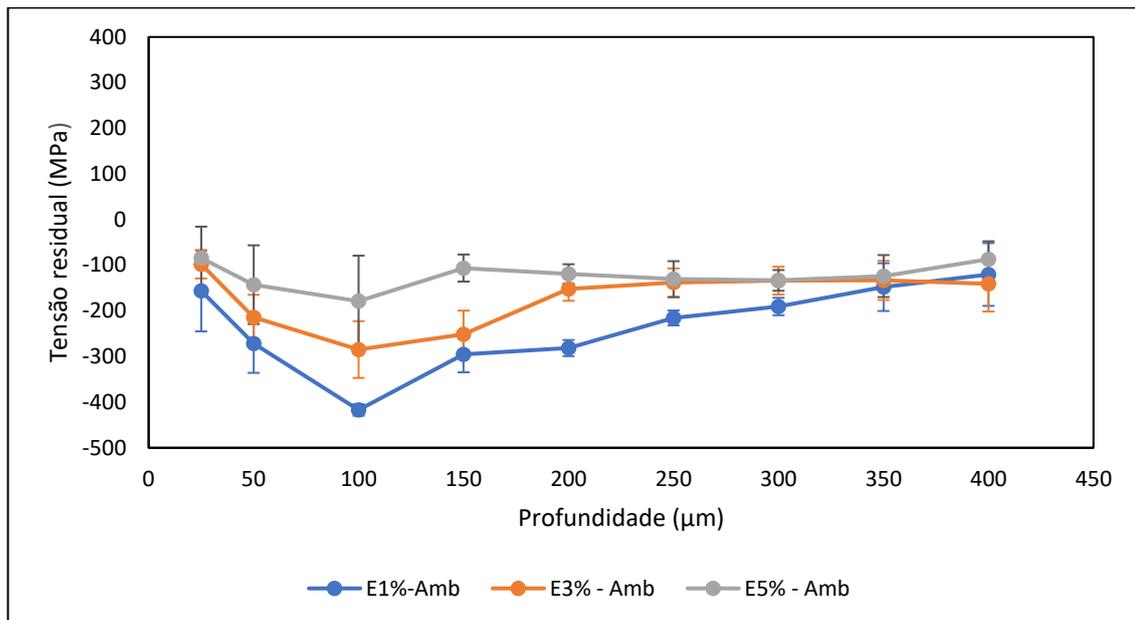


Figura 4.14 - Tensão residual para os discos Trilho após os ensaios realizados à temperatura ambiente com 1,3 e 5% de escorregamentos. Fonte: Autor.

Seguindo a metodologia aplicada aos discos Roda, na Figura 4.15, são apresentados os resultados de tensão residual da região mais próxima da superfície dos discos que representam o trilho em função da tensão de cisalhamento máximo. Assim, como no disco Roda, foi observado uma boa correlação linear entre tensão de máxima de cisalhamento e tensão residual.

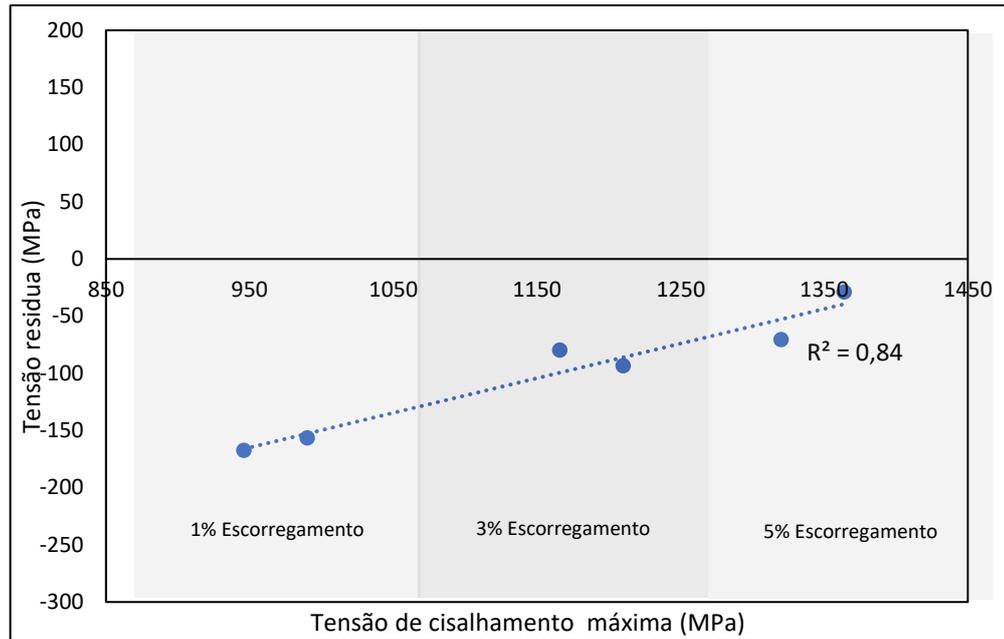


Figura 4.15 - Efeito da tensão de cisalhamento na tensão residual dos discos Trilho a 25  $\mu\text{m}$  da superfície. Fonte: Autor.

A equação 4.4 apresenta um modelo matemático que descreve o efeito da tensão de cisalhamento do disco Trilho, independente do escorregamento, na tensão residual. Cada ponto representa o resultado de um ensaio.

$$\sigma_{\text{res.}} = 0,40\tau_{\text{máx}} - 561,17 \quad \text{eq. 4.4}$$

Li e colaboradores (2020) afirmam que a tensão residual dos trilhos instalados poderá mudar significativamente por causa do contato roda-trilho, mas logo se estabilizará após alguns ciclos de contato entre estes componentes. Pyzalla e colaboradores (2001) analisaram um trilho de aço perlítico após 9 anos de serviço. Os autores afirmam que em razão da deformação plástica, as tensões residuais também evoluíram. Eles observaram uma tensão residual de 200 MPa compressiva na superfície. Neste trabalho, para condição de escorregamento de 1%, que é característica da região de retas na ferrovia, a tensão residual após ensaio foi de 156 MPa compressiva.

Assim, como observado nos ensaios disco-contra-disco, durante a operação ferroviária, devido aos altos gradientes de temperatura, o processo de encruamento do material e as transformações de fase que ocorrem, quando a roda desliza sobre o trilho, geram tensões residuais diferentes das observadas no processo de fabricação das rodas e trilhos

(WALLENTIN; BJARNEHED; LUNDÉN, 2005). Dessa forma, os resultados obtidos neste trabalho estão alinhados com o que acontece na ferrovia, mostrando que o ensaio disco-contra-disco é capaz de simular os principais eventos que ocorrem durante a operação ferroviária também no campo das tensões residuais.

Um comparativo entre a tensão residual dos discos que representam a roda e o trilho é apresentado na Figura 4.16. Os resultados revelam que as tensões residuais dos discos que representam a roda são sempre menos compressivas do que os discos que representam o trilho, além do fato de que a tensão residual para o disco Roda é governada pelo escorregamento, ou seja, influenciada pela força tangencial que atua no contato. No disco trilho, é observada pouca influência do escorregamento sobre a tensão residual, sugerindo que a força normal parece ser determinante para a definição da tensão residual para esse disco.

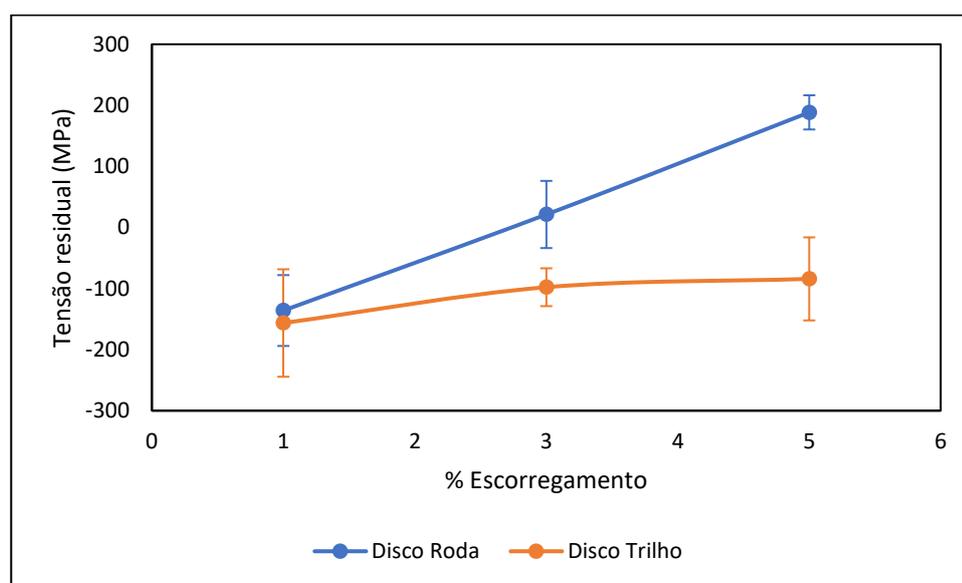


Figura 4.16 – Comparativo entre a tensão residual do disco Roda e disco Trilho mensurada a 25  $\mu\text{m}$  da superfície. Fonte: Autor.

Deters e Proksch (2005) e Hu e colaboradores (2023) sugeriram a existência de um estado de tensão diferente entre os discos que representam a roda e o trilho ao explicarem o maior encruamento do disco que representa o trilho em um ensaio disco-contra-disco, entretanto os autores não realizaram ensaios para avaliarem os campos de tensões residuais existentes entre os discos (DETERS; PROKSCH, 2005; HU *et al.*, 2023). Dessa forma, neste trabalho, confirma-se a hipótese apresentada por esses estudos, de que sobre os discos atuam diferentes campos de tensão. À luz desse fato, pode contribuir para o entendimento do motivo para o maior

desgaste observado nos discos Roda quando comparados com o desgaste dos discos Trilho, conforme visto na seção 4.4.

O aparecimento de diferentes campos de tensão nos discos pode ter sua gênese na dinâmica do contato. Garnham e Beynon (1992) mostraram que, em sistemas com a presença de rolamento com deslizamento, ocorre inversão na atuação de campos trativas e compressivas entre os discos em função do ponto de contato entre os discos. Antes do contato, o disco de maior velocidade será freado, surgindo um campo de tensões compressivas nessa região. Após o contato, também em razão da maior velocidade surgirá nessa região um campo de tensões trativas. Para o disco de menor velocidade esses campos são invertidos, conforme pode ser observado na Figura 4.17 (GARNHAM; BEYNON, 1992).

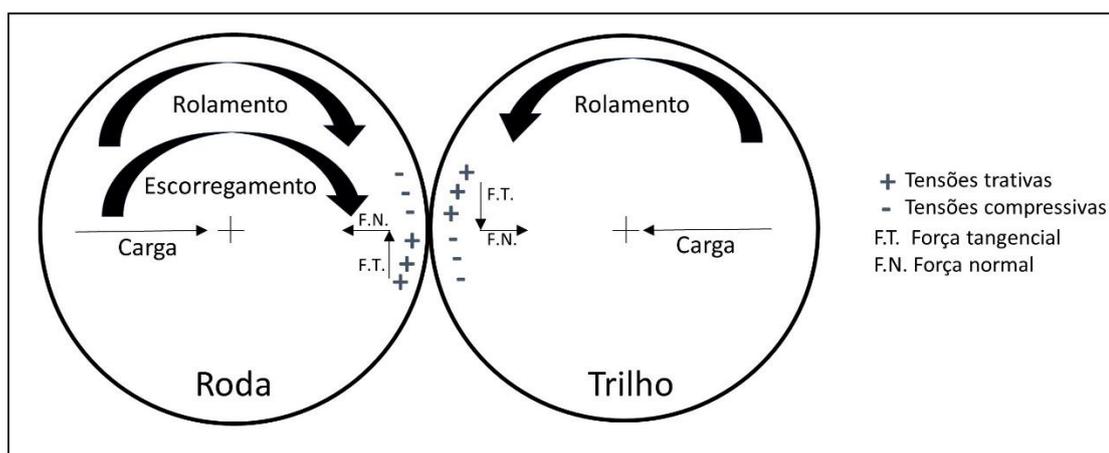


Figura 4.17 – Dinâmica do contato do disco Roda e disco Trilho em condição de escorregamento com rolamento. N.F = atuação da força normal, T.F = atuação força tangencial e as tensões trativas são representadas por “+” enquanto as tensões compressivas são retratadas por “-”. Adaptado de Garnham; Beynon (1992).

Embora este trabalho tenha apresentado novas contribuições para a compreensão dos campos de tensões que atuam sobre os discos, quando estes estão sob ação de rolamento com deslizamento, entende-se que novos estudos precisam ser realizados, principalmente para esclarecimento de como outras variáveis influenciam os campos de tensões.

#### 4.1.5 ANÁLISE SUPERFICIAL DOS DISCOS

As superfícies dos discos foram avaliadas a partir da análise por espectrometria Raman, por imagens captadas por microscópio ótico estereoscópico e por MEV. A espectrometria Raman permitiu caracterizar os tipos de óxidos presentes. A análise de imagem por estereoscopia, por sua vez, permitiu verificar o grau de oxidação das superfícies ensaiadas. O MEV trouxe informações sobre a morfologia superficial dos discos. Assim as três técnicas contribuíram para elucidar os principais mecanismos de desgaste atuantes nos discos em função do escorregamento.

##### 4.1.5.1 Avaliação dos óxidos formados por Espectrometria Raman

Na Figura 4.18 são apresentados os modos vibracionais identificados para os discos que representam o trilho para os ensaios que ocorreram com 1, 3 e 5% de escorregamento realizados em temperatura ambiente. Para as três condições de escorregamento, é possível notar a formação das fases dos óxidos e oxihidróxidos de ferro formadas durante os ensaios disco-contra-disco, identificando os picos 208 - 212, 381, 395 - 400, 469 e 491  $\text{cm}^{-1}$  referentes aos modos vibracionais da Goetita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ). A fase Hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) também foi caracterizada através da presença dos modos vibracionais encontrados em 269, 283, 279, 588, 579, 1302 e 1310, o pico em 1318  $\text{cm}^{-1}$  surge pelo efeito ativo do modo de espalhamento de segunda ordem. O último óxido foi a Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), apontado pelos estiramentos vibracionais em 524, 647 e 660  $\text{cm}^{-1}$ .

Para a condição com 3 e 5% de escorregamento, identificou-se também a presença dos modos vibracionais D (1356  $\text{cm}^{-1}$ ), que está relacionada à presença de anéis aromáticos, e G (1576  $\text{cm}^{-1}$ ), ao movimento de alongamento da ligação no plano dos átomos de carbono  $\text{sp}^2$ , referente ao carbono hidrogenado com baixa cristalinidade (CROCKETT *et al.*, 2004; DE MELLO *et al.*, 2017). A presença desses modos vibracionais que pode estar relacionada com resíduos de óleo mineral que foi utilizado para preservar as amostras no contato com ar atmosférico após os ensaios disco-contra-disco.

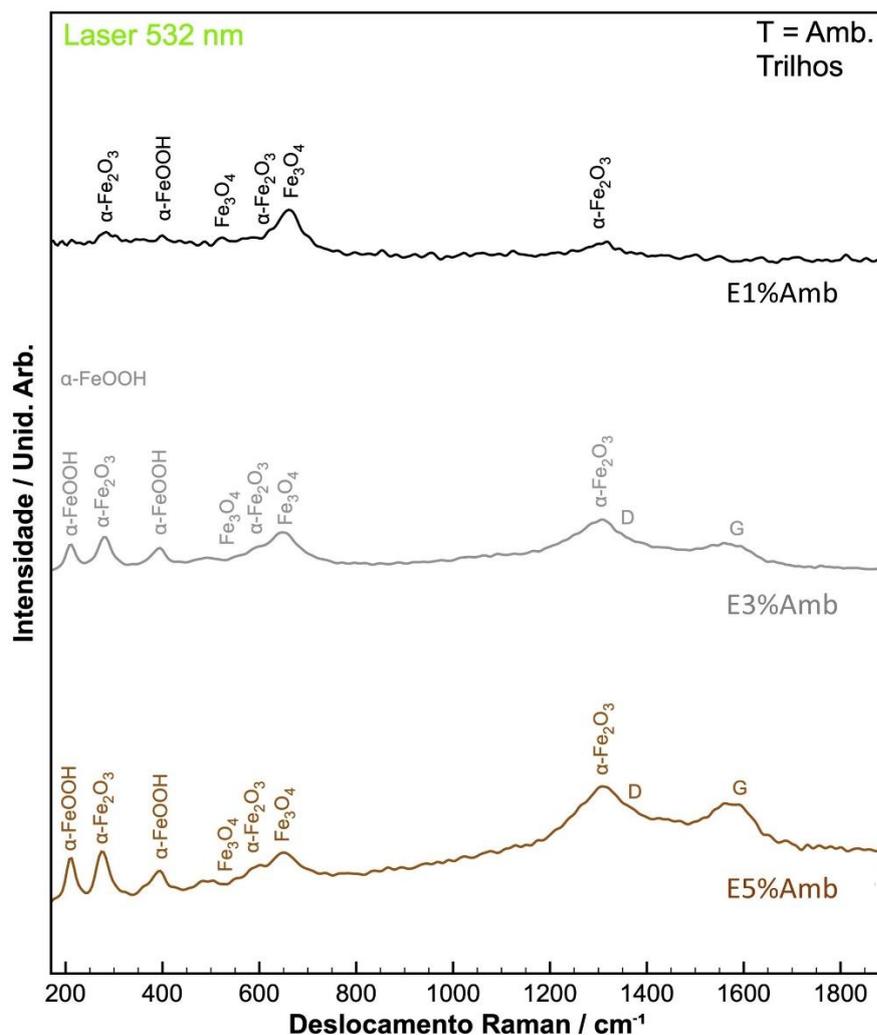


Figura 4.18 - Espectros Raman para os discos Trilho para os ensaios realizados em temperatura ambiente com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

Na Tabela 4.2, são apresentadas as posições características das bandas Raman para diversos óxidos registrados na literatura. As referências apresentadas foram utilizadas na identificação dos modos vibracionais de todos os espectros Raman identificados neste trabalho.

Tabela 4.2 - Posições das Bandas Raman para os produtos de corrosão comumente apresentados para os aços.

Composto	Referências (cm <sup>-1</sup> )
$\alpha$ -FeOOH	205, 386, 481 (OH; COOK; TOWNSEND, 1998)
	205, 245, 300, 390, 415, 480 (FROMENT; TOURNIÉ; COLOMBAN, 2008)
	206, 388, 482 (NEFF <i>et al.</i> , 2004)
	390 (ZIN <i>et al.</i> , 2018)
	390, 480 (OHTSUKA; SATO, 1986)
	385, 479 (DE FARIA; VENÂNCIO SILVA; DE OLIVEIRA, 1997)
$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	245, 292, 497 (OH; COOK; TOWNSEND, 1998)
	290 (ZIN <i>et al.</i> , 2018)
	245, 295, 500, 1320 (OHTSUKA; SATO, 1986)
	245, 298, 500, 1319 (MARSHALL; DUFRESNE; RUFLEDT, 2020)
	225, 300, 412, 625 (BANERJI <i>et al.</i> , 2017)
	245, 299, 497, 1042, 1103 (LÜBBE <i>et al.</i> , 2010)
	286, 1305 (ISHIZAKA <i>et al.</i> , 2018)
	237, 283 (DE FARIA; VENÂNCIO SILVA; DE OLIVEIRA, 1997)
	296 (SHU <i>et al.</i> , 2022b)
	235, 284, 498, 1308 (NEFF <i>et al.</i> , 2004)
290, 497, (CROCKETT <i>et al.</i> , 2004)	
223, 294, 411, 497, 608 e 1315 (ZHU <i>et al.</i> , 2018)	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	532, 667 (OH; COOK; TOWNSEND, 1998)
	640 (ZIN <i>et al.</i> , 2018)
	540, 665 (OHTSUKA; SATO, 1986)
	306, 538, 668 (LÜBBE <i>et al.</i> , 2010)
	662 (ISHIZAKA <i>et al.</i> , 2018)
	534, 663 (DE FARIA; VENÂNCIO SILVA; DE OLIVEIRA, 1997)
	667 (SHU <i>et al.</i> , 2022b)
	542, 669 (NEFF <i>et al.</i> , 2004)
	667 (CROCKETT <i>et al.</i> , 2004)
662 (ZHU <i>et al.</i> , 2018)	
D	1320 (BANERJI <i>et al.</i> , 2017)
	1320 (NAKAHARA <i>et al.</i> , 2011)
	1330 (CROCKETT <i>et al.</i> , 2004)
	1360 (DE MELLO <i>et al.</i> , 2017)
G	1556 (BANERJI <i>et al.</i> , 2017)
	1570 (CROCKETT <i>et al.</i> , 2004)
	1586 (NAKAHARA <i>et al.</i> , 2011)
	1590 (DE MELLO <i>et al.</i> , 2017)

Fonte: Autor.

Para os discos que representam a roda (Figura 4.19), identifica-se a presença dos mesmos produtos de corrosão encontrados para os discos Trilho, os picos em 208, 391 e 490 cm<sup>-1</sup> característicos da Goetita. A Hematita é caracterizada pela presença dos picos 278-283, 592 e 1310 cm<sup>-1</sup>. A Magnetita foi caracterizada pelo típico pico em 664 cm<sup>-1</sup>. A presença de picos D e G foi identificada no ensaio com 3% de escorregamento em, respectivamente, 1347 e 1580 cm<sup>-1</sup>.

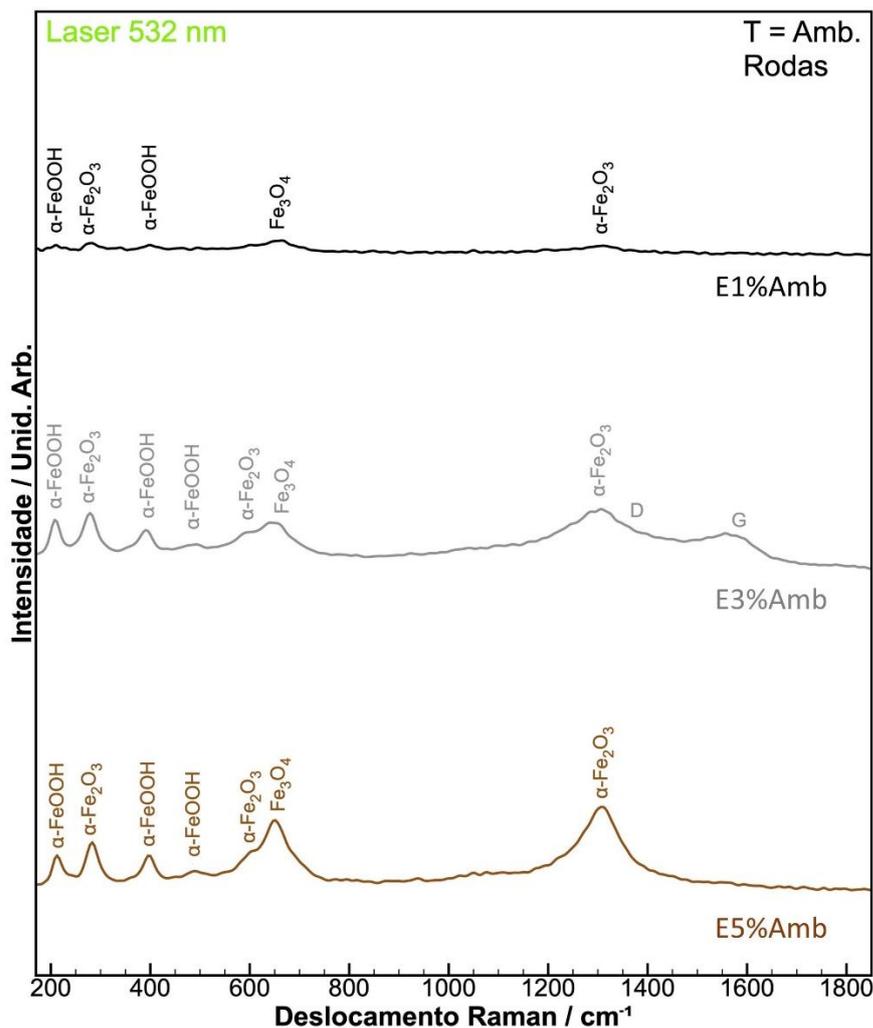


Figura 4.19 - Espectros Raman para os discos Roda para os ensaios realizados em temperatura ambiente com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

Os resultados apresentados mostram que os produtos de corrosão encontrados tanto para as amostras dos discos Trilhos como para os discos Rodas nos ensaios foram essencialmente a presença de Hematita, Magnetita e Goetita. A presença da Magnetita e Hematita são produtos de corrosão comumente observados após ensaios de tribologia utilizando o disco-contra-disco.

Nakahara e colaboradores (2011) ao estudarem a relação entre a camada de óxido superficial e as características do coeficiente de atrito transitório para dois aços ferroviários sob condições não lubrificadas e lubrificadas com água, identificaram a presença da  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Hematita), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Magnetita), e a  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Maghemita) como produto de corrosão induzida pelo ensaio disco-contra-disco (NAKAHARA *et al.*, 2011). No trabalho de Zhu e colaboradores os autores observaram a presença predominantemente de Hematita e Magnetita, ao avaliarem dois aços de roda sob diferentes condições de contato (ZHU *et al.*, 2018). Em mais recente

estudo, Shu e colaboradores (2022a) também identificaram a presença de hematita e magnetita ao analisarem o efeito da adição de areia do deserto no contato roda/trilho utilizando disco-contra-disco (SHU *et al.*, 2022a).

Ao se fazer um paralelo entre os resultados obtidos no laboratório, com o observado em campo, nota-se que os resultados obtidos no ensaio disco-contra-disco são condizentes com o observado em campo. Suzumura e colaboradores (2011) avaliaram a presença a formação de óxidos *in situ* em uma ferrovia utilizando a técnica de difração de raio x portátil, os autores encontram a presença de Magnetita e hidróxidos diversos, como  $\beta$ -FeOOH,  $\gamma$ -FeOOH e  $\alpha$ -FeOOH (SUZUMURA *et al.*, 2011). Sone e colaboradores (2008) utilizaram técnicas diferentes, espectrometria Raman e absorção de infravermelho, também para uma avaliação *in situ*, e observaram a presença de hematita e hidróxidos diversos como  $\beta$ -FeOOH,  $\gamma$ -FeOOH e  $\alpha$ -FeOOH (SONE *et al.*, 2008).

#### 4.1.5.2 Análise por Microscopia Ótica estereoscópica

Ao avaliar os discos que representam o trilho dos ensaios realizados à temperatura ambiente, é possível identificar alguns pontos de interesse, mostrados na Figura 4.20. O primeiro ponto é que, em baixo escorregamento, é possível observar a presença de uma irregularidade superficial que ocorre de maneira periódica, conforme visto na Figura 4.20 (a). Ela é similar à corrugação que ocorre nos trilhos ferroviários. A presença dessa irregularidade na superfície dos discos já foi observada na literatura em condições similares de baixo escorregamento, porém em escala microscópica (MA *et al.*, 2016). Mazzù e colaboradores (2015) observaram, em ensaios disco-contra-disco, alterações superficiais periódicas também nas condições de baixo escorregamento. Os autores sugerem que o aparecimento das irregularidades está associado à dinâmica do contato, ou seja, às pequenas variações de atrito e pressão motivadas pela alternância das fases de aderência e deslizamento e pela elasticidade do corpo de prova (MAZZÙ *et al.*, 2015).

Outro ponto que chama a atenção é a presença de uma coloração característica de formação de óxidos superficiais em todas as condições. Na Figura 4.20 (c), é possível observar a presença de formação de *spalling* (seta amarela), evidenciando uma característica de um mecanismo de desgaste severo (LEWIS; OLOFSSON, 2009; LEWISA; DWYER-JOYCE, 2004).

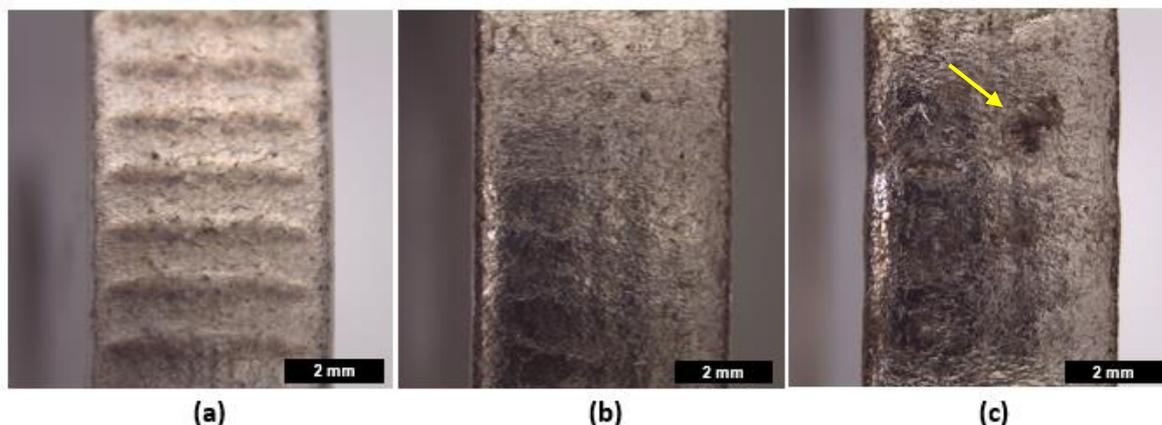


Figura 4.20 - Características superficiais dos discos Trilho observada em microscopia estereoscópica. Em (a) condição de ensaio E1%amb, em (b) E3%amb e em (c) E5%amb. (Imagem obtida por microscopia estereoscópica, sem ataque químico). Fonte: Autor.

Ao avaliar os discos que representam a roda, observa-se a influência do escorregamento na característica da camada de óxido. Para baixo escorregamento, na Figura 4.21 (a), é possível observar que a camada de óxido permanece uniforme e aderente em toda a superfície após o ensaio. Para maiores escorregamentos, por sua vez, percebe-se nas imagens a presença de uma região com coloração compatível à de metal exposto, conforme identificada pelas setas amarelas na Figura 4.21 (b) e (c), sendo a primeira em menor quantidade que na segunda.

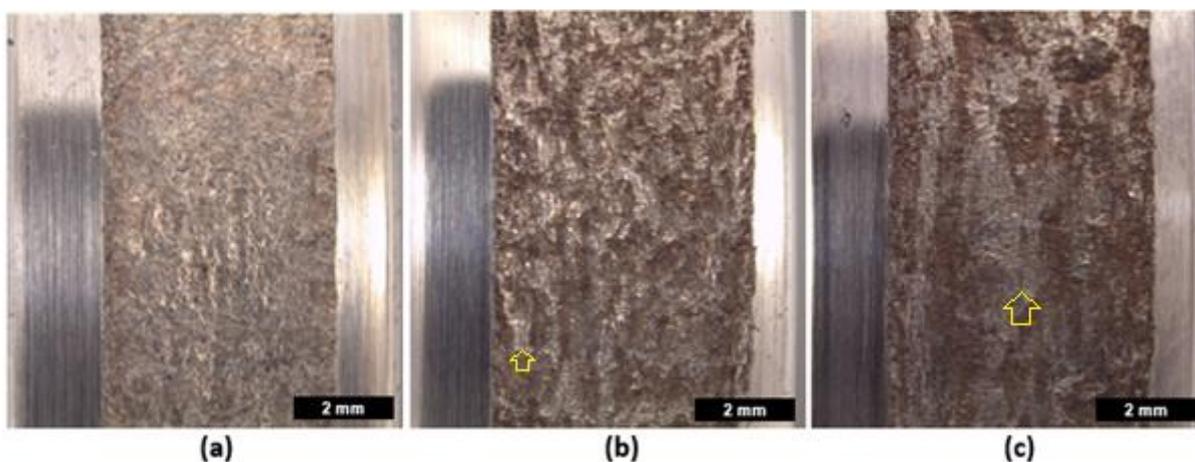


Figura 4.21 - Características superficiais dos discos Roda observada em microscopia estereoscópica. Em (a) condição de ensaio E1%amb, em (b) E3%amb e em (c) E5%amb. (Imagem obtida por microscopia estereoscópica, sem ataque químico). Fonte: Autor.

Ressalta-se, ainda, que nos discos Roda existe um maior estado de oxidação na superfície, evidenciado pela presença de uma camada marrom alaranjada, que é característica da presença de óxido de ferro. Segundo Zhu (2017), essa coloração é típica de indicação da existência de Hematita (ZHU, 2017). A presença de uma oxidação mais pronunciada no disco Roda é consistente com os resultados da literatura (DETERS; PROKSCH, 2005; HU *et al.*, 2023; SHU *et al.*, 2022b). Essa característica nos discos Roda sugerem a atuação de um mecanismo de desgaste por tribocorrosão o que não ocorre nos discos Trilho.

#### 4.1.5.3 Análise por MEV

Analisar a superfície dos discos com MEV é um importante recurso na tribologia, pois permite avaliar detalhes da topografia que indicam os mecanismos de desgastes atuantes no discos ensaiados. Na Figura 4.22 são apresentadas as micrografias para os discos Trilho (A) e (B) e para os discos Roda (C) e (D) para os ensaios E1% Amb.

Na imagem é possível identificar característica típica do FCR, com a presença de trincas indicando a presença do mecanismo de *ratcheting*. As delaminações ocorrem em função do acúmulo de deformação plástica provocado pelos sucessivos ciclos durante o ensaio disco-contra-disco, que levam o material ao esgotamento plástico, e, conseqüentemente, falha pelo *ratcheting* (LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004; LEWIS; OLOFSSON, 2009; TYFOUR; BEYNON; KAPOOR, 1995).

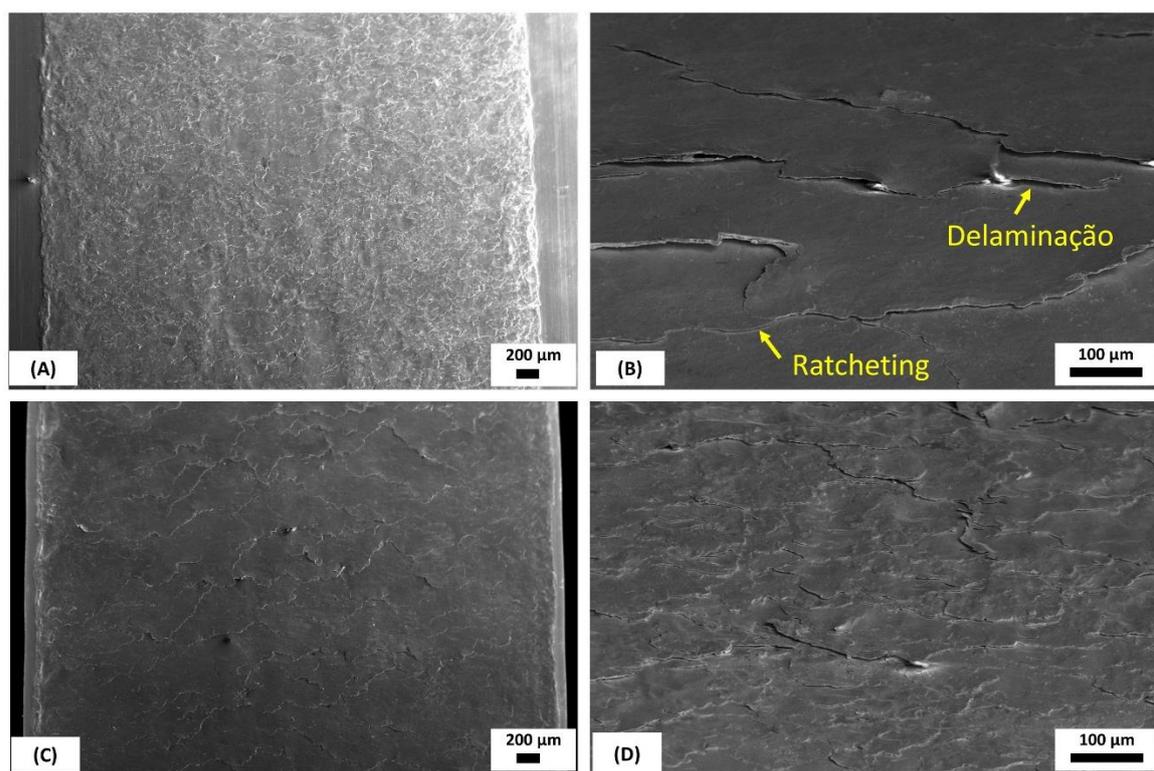


Figura 4.22 – Micrografias obtidas por MEV dos discos Trilho (A) e (B) e para os discos Roda (C) e (D) para os ensaios E1% Amb (Imagem sem ataque químico). Fonte: Autor.

Esse mecanismo de desgaste é frequentemente encontrado na literatura, em especial para situações com baixo escorregamento entre roda/trilho (FANTECELLE STREY *et al.*, 2021; MA *et al.*, 2016; MIRANDA *et al.*, 2022; REZENDE *et al.*, 2020a; WANG *et al.*, 2017a; ZHOU *et al.*, 2016). Nos ensaios com 3% de escorregamento, observaram-se os mesmos mecanismos atuantes nos corpos de prova.

Para 5% de escorregamento novos mecanismos foram identificados e são apresentados na Figura 4.23. Na imagem, nota-se a superfície do disco Roda com características bem distintas das apresentadas nos ensaios com 1% de escorregamento. Destaca-se a presença de sulcamentos, provocada provavelmente pela presença de óxidos que foram desprendidos do contato, e que por apresentarem elevada dureza (Hematita 1038 HV) atuam como terceiro corpo (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014). Outra hipótese seria o fato de os debris destacados do disco do trilho atuarem como terceiro corpo, entretanto, como será discutido na seção 4.7.2, a relação de dureza entre os discos é menor do que 1,2 o que reduz a possibilidade de atuação da abrasão sob tal hipótese.

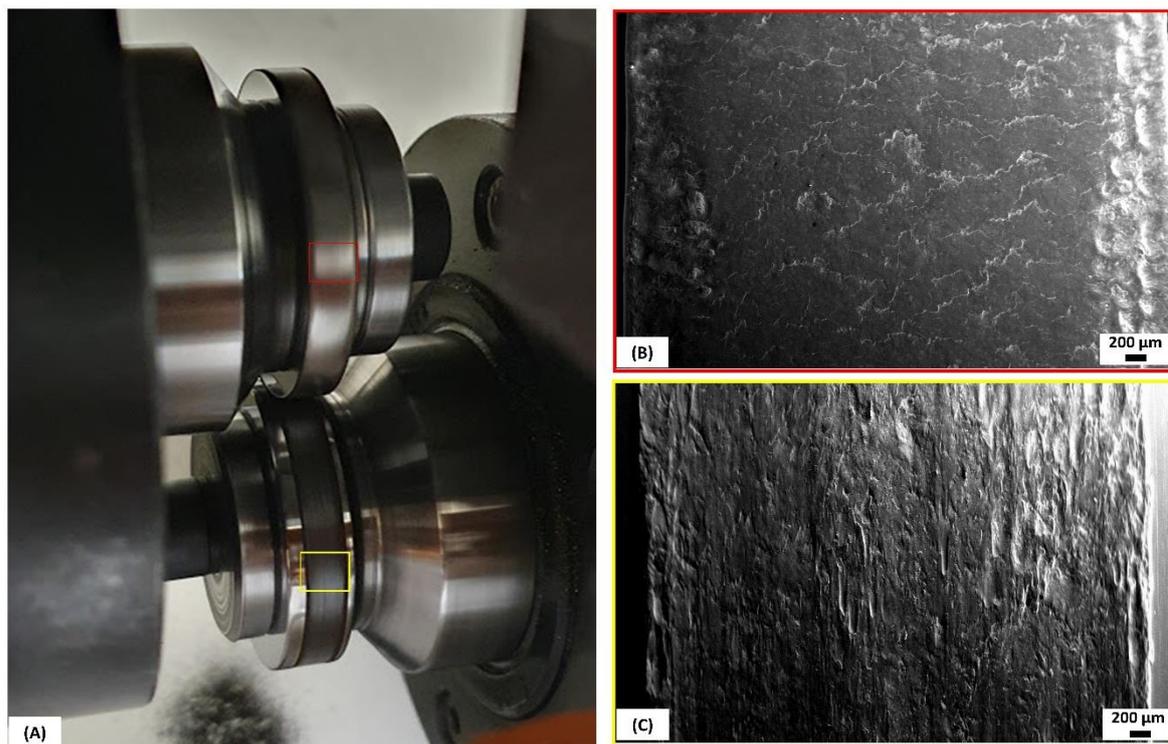


Figura 4.23 - Em (A) imagem durante o ensaio na condição E5% Amb com câmera lenta. Em (B) superfície do disco que representa o trilho, MEV. Em (C) superfície do disco que representa a roda, MEV (imagem MEV, sem ataque químico). Fonte: Autor.

Cabe ressaltar, a presença de maiores danos provocados na borda do contato entre os discos. Uma hipótese para isso é que os ensaios com maiores escorregamentos geraram uma maior quantidade de debris e óxidos, os quais, ao se destacarem do contato, ficaram acumulados nas bordas, gerando maiores danos nessas regiões. A elucidação desse fato pode ser observada na imagem captada por uma câmera lenta durante o ensaio disco-contra-disco, representada pela Figura 4.23 (A).

Nessa perspectiva, percebe-se, que com o aumento do escorregamento para 5%, houve uma troca no mecanismo de desgaste de FCR para desgaste abrasivo. Na literatura essa mudança de mecanismo já foi observada por Zhou e colaboradores (2016a) ao conduzirem ensaios disco-contra-disco com 9 % de escorregamento.

#### 4.1.6 ANÁLISE SUBSUPERFICIAL DOS DISCOS

Durante o contato da roda com o trilho ocorrem importantes transformações microestruturais na subsuperfície desses componentes. Desse modo, as análises microestruturais e o levantamento dos perfis de dureza são importantes para esclarecer a influência do escorregamento nos fenômenos que ocorrem na subsuperfície dos materiais.

##### 4.1.6.1 Camada deformada

Na Figura 4.25 são apresentadas as características da camada deformada para os ensaios realizados em temperatura ambiente. A camada deformada para os discos Trilho variou de  $157\pm 5$ ,  $182\pm 3$  e  $202\pm 7$   $\mu\text{m}$  para ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamento, respectivamente. Para os discos Roda, a profundidade variou de  $160\pm 4$ ,  $178\pm 6$  e  $190\pm 5$   $\mu\text{m}$  para ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamento nessa ordem, comportando-se de maneira similar a dos dados obtidos com os discos Trilho. Assim, percebe-se que a profundidade da camada deformada é influenciada pelo nível do escorregamento, conforme constatado pela Figura 4.24.

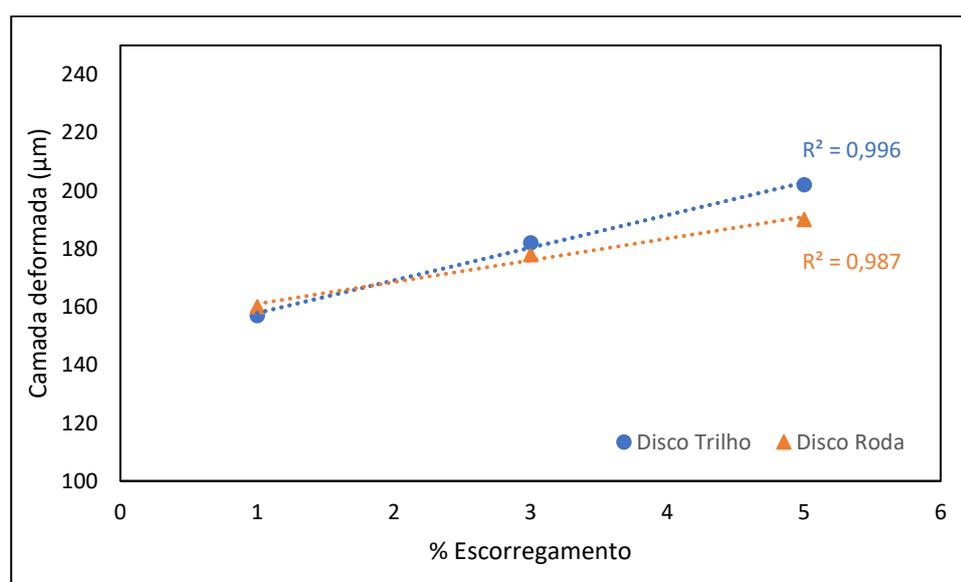


Figura 4.24 - Influência do escorregamento na profundidade da camada deformada para os ensaios realizados à temperatura ambiente. Fonte: Autor.

Na Figura 4.25, são retratadas as micrografias captadas por M.O para os ensaios realizados à temperatura ambiente com 1 e 5% de escorregamento, que são as duas condições extremas de ensaios.

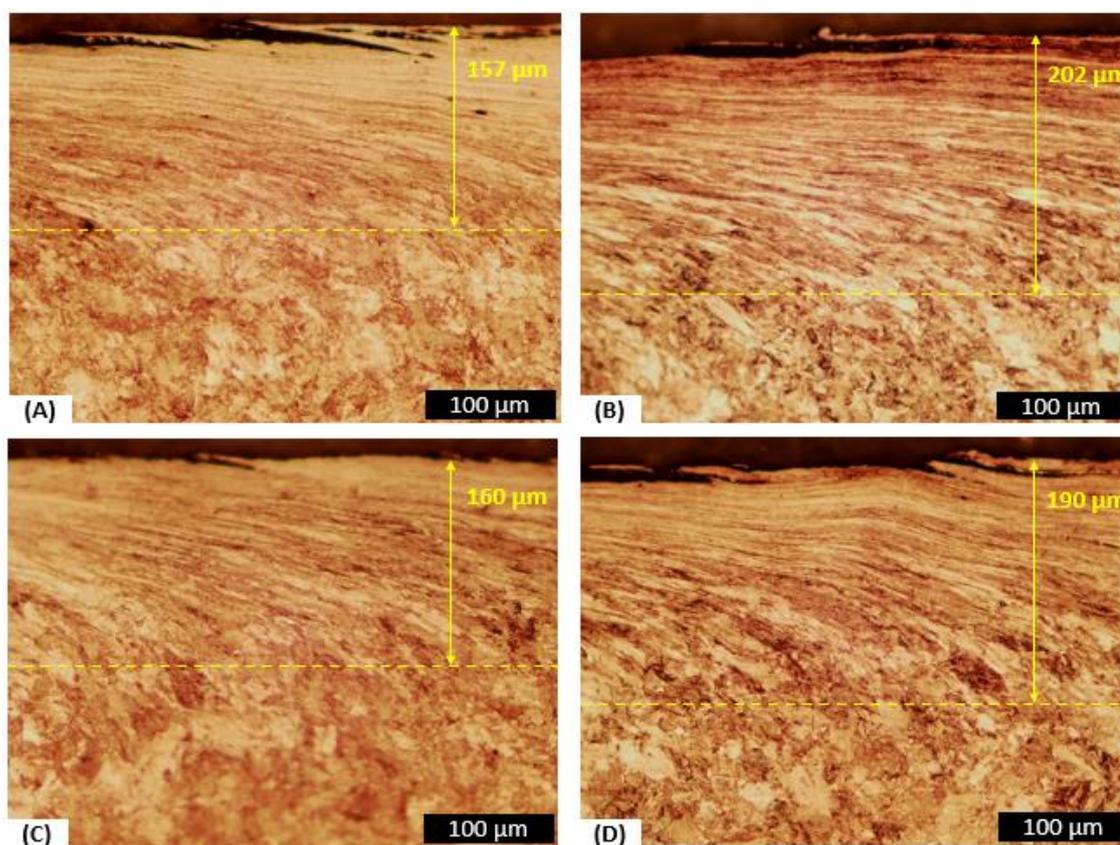


Figura 4.25 - Camada deformada, ataque com Nital M.O. Em (A) Disco Trilho E1% Amb, (B) Disco Trilho E5% Amb, (C) Disco Roda E1% Amb, e em (D) Disco Roda E5% Amb (imagem em M.O, ataque químico com Nital 2%). Fonte: Autor.

Os resultados obtidos estão em concordância com a literatura. Ma e colaboradores (2016), em seu trabalho, realizando ensaios disco-contra-disco a 200 RPM, 437 N por 288.000 ciclos, observaram um incremento de profundidade de camada deformada de 43 para 165  $\mu\text{m}$  para os ensaios realizados com 0,17% e 9,43% de escorregamento respectivamente (MA *et al.*, 2016). Hu e colaboradores, empreendendo ensaios com 500 RPM, 1500 MPa por 25.000 ciclos, encontraram um aumento da camada deformada de 75 para 206  $\mu\text{m}$  para os ensaios realizados com 0,2 e 5% de escorregamento respectivamente (HU *et al.*, 2020a). Por sua vez, no trabalho de Lewis e Dwyer-Joyce e (2004), o aumento da região deformada foi ainda mais acentuado passando de 20 para 400  $\mu\text{m}$  para ensaios realizados a 400 RPM, 1500 MPa e escorregamento

variando de 0,2 a 3% de escorregamento (LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004). Esses resultados confirmam o efeito do escorregamento no aumento da profundidade da camada deformada.

Para compreender a influência do escorregamento na profundidade da camada deformada, precisa-se levar em consideração as tensões de cisalhamento ( $\tau_{xz}$ ) que atuam ao longo do ensaio e são provenientes do efeito sinérgico da pressão de contato e o coeficiente de atrito (HU *et al.*, 2021a). Como apresentado na seção 4.2, houve um aumento do coeficiente de atrito em função do escorregamento do ensaio. Desse modo, surgem tensões de cisalhamento crescentes também em função do escorregamento, e, quando essa tensão de cisalhamento excede a resistência ao cisalhamento do material, gera-se o escoamento plástico observado neste trabalho.

#### 4.1.6.2 Perfil de dureza

Enquanto o segmento 4.1.6.1 deste trabalho apresenta uma análise qualitativa do grau de encruamento, realizada através de imagem de microscopia ótica, esta seção exibe uma análise quantitativa do grau de encruamento dos discos após os ensaios disco-contra-disco levantada pelo perfil de dureza apresentado na Figura 4.26 e Figura 4.27.

Na Figura 4.26, são apresentados os resultados do perfil de dureza dos discos que representam o trilho. Identifica-se que a curva de perfil de dureza apresenta três regiões distintas que ocorrem independentemente do escorregamento utilizado no ensaio.

A região I, mais próxima da superfície, é onde ocorre um encruamento mais severo, com as linhas de deformação quase paralelas à superfície. Essa região se estende da superfície do disco a até aproximadamente 150 – 200  $\mu\text{m}$ . A região II é uma zona de transição, e a curva de encruamento apresenta uma atenuação na taxa de encruamento. Esse trecho se estende até 250 – 300  $\mu\text{m}$  de profundidade. Por fim, após os 300  $\mu\text{m}$  de profundidade, surge uma região III, no qual a dureza parece se estabilizar, aproximando-se da dureza da matriz do aço estudado. Esse comportamento vai ao encontro do observado no trabalho de Hu e colaboradores, que avaliaram a evolução microestrutural de um aço classe C após ensaios disco-contra-disco (HU *et al.*, 2021a)

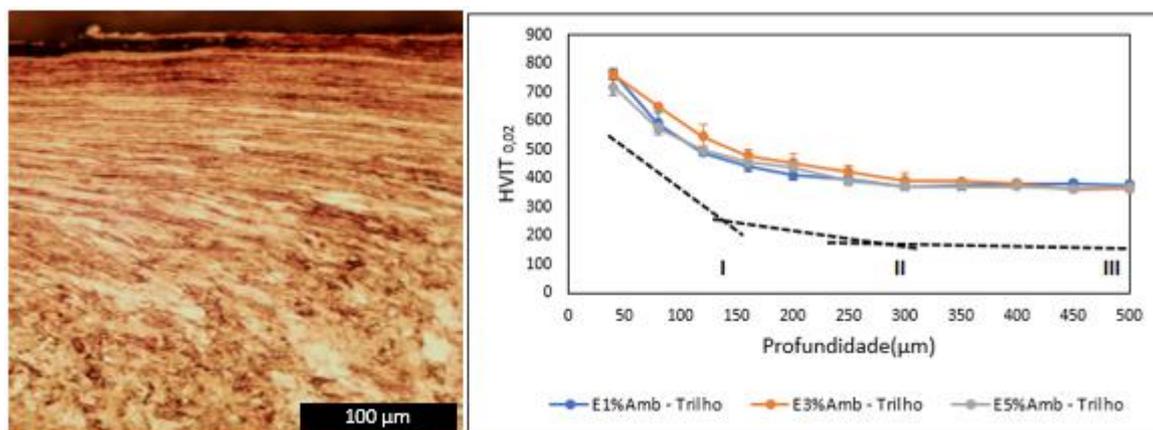


Figura 4.26 - Perfil de dureza dos discos Trilho para os ensaios realizados à temperatura ambiente (imagem obtida por M.O, ataque químico com Nital 2%). Fonte: Autor.

No que tange ao incremento de dureza superficial, as condições de 1 e 3% de escorregamento apresentaram um maior encruamento, seguido pela condição de 5% de escorregamento. A dureza superficial mensurada foi de  $766 \pm 19$ ,  $760 \pm 20$  e  $718 \pm 28$  HV, respectivamente para 1,3 e 5% de escorregamento.

Os resultados são consistentes com os obtidos em testes de laboratórios utilizando disco-contra-disco (LEWIS *et al.*, 2019; MA *et al.*, 2016). Já, em trabalhos de campo, Tressia e colaboradores avaliaram um trilho de curva após sete anos de serviço sob carga pesada e, ao caracterizarem, encontraram uma dureza de  $550 \pm 9$  HV, bem menor do que se observou neste trabalho. Cabe ressaltar, que os autores avaliaram a região do canto de bitola, que é uma região que sofre um desgaste muito elevado, o que é capaz de explicar a dureza menor, quando comparado ao presente trabalho (TRESSIA *et al.*, 2021).

Na Figura 4.27, é apresentado o perfil de dureza dos discos Roda para os ensaios realizados à temperatura ambiente. A maior dureza atingida foi para a condição de 3 e 5% seguida por 1% de escorregamento. As durezas medidas a  $40 \mu\text{m}$  da superfície foram  $658 \pm 10$ ,  $652 \pm 20$  e  $573 \pm 24$  HV, respectivamente. Os resultados evidenciam o efeito do escorregamento no incremento de dureza superficial, comportamento também identificado por Ma *et al.* (2016).

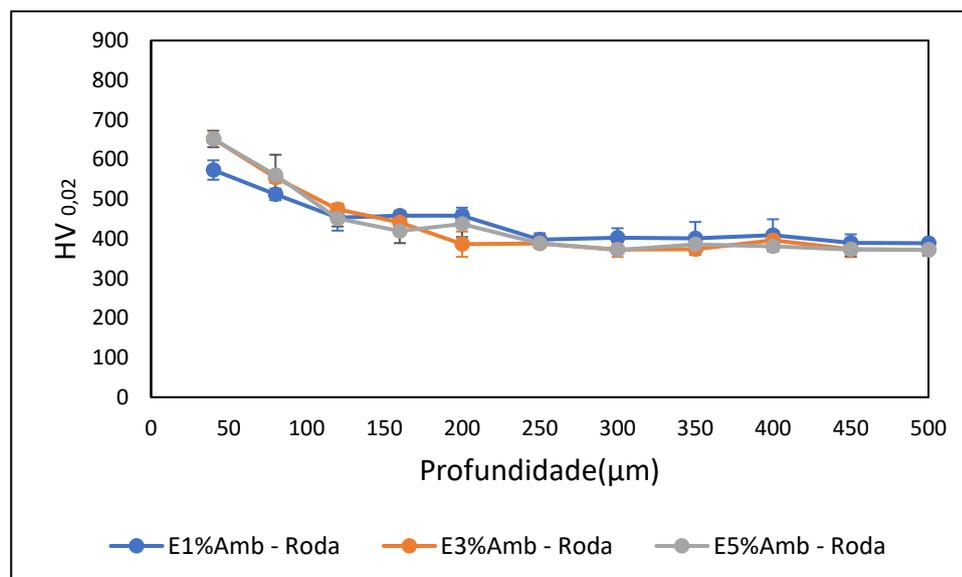


Figura 4.27 - Perfil de dureza dos discos Roda para os ensaios realizados à temperatura ambiente. Fonte: Autor.

Hu e colaboradores ao estudarem o efeito da relação de dureza entre roda e trilho e o escorregamento nas propriedades tribológicas de rodas e trilhos, observaram também um efeito do escorregamento no aumento de dureza superficial das rodas ao analisarem a relação de dureza roda sobre dureza de trilho de 1,025, que é uma condição bem próxima ao presente estudo. Para a mesma relação de dureza, não foi observada influência do escorregamento no aumento de dureza superficial dos discos de trilhos (HU *et al.*, 2020b).

Recentemente, Leso e colaboradores encontraram resultados que reforçam o efeito do escorregamento no aumento da dureza superficial dos discos Roda. Os autores observaram que a microdureza superfície/subsuperfície também aumentou com a razão de escorregamento, atingindo valor máximo com ensaios disco-contra-disco com 27% de escorregamento (LESO *et al.*, 2022). A explicação para o aumento na dureza superficial seria um aumento na densidade de discordâncias resultado das maiores forças trativas em maiores escorregamentos (LESO *et al.*, 2022).

Após compreensão do efeito do escorregamento no encruamento dos discos Roda e do trilho, apresenta-se, na Figura 4.28, uma comparação entre a dureza máxima atingida para os discos Roda e Trilho em função do escorregamento. Verifica-se que o disco Trilho possui maior encruamento do que o disco Roda para todas as condições de escorregamento avaliadas neste trabalho.

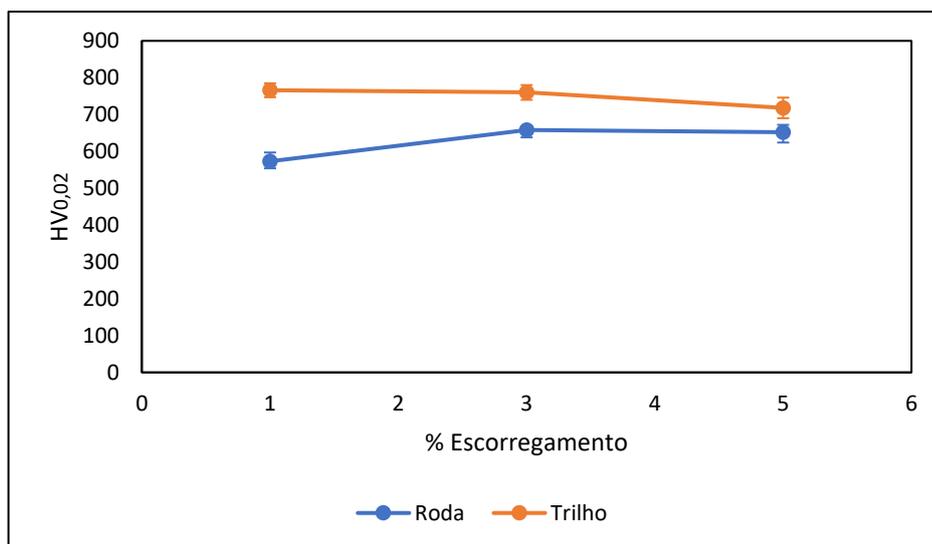


Figura 4.28 - Comparação da dureza a 40  $\mu\text{m}$  da superfície entre os discos Roda e Trilho em diferentes escorregamentos. Fonte: Autor.

Esse comportamento já foi observado em trabalhos publicados recentemente (MA *et al.*, 2016; RODRÍGUEZ-ARANA *et al.*, 2022; SHI *et al.*, 2022). Entretanto, esses trabalhos justificam o maior encruamento do trilho pela sua microestrutura que apresenta uma menor quantidade de ferrita proeutetoide quando comparado ao aço de roda ferroviária. Contudo, a metodologia empregada neste trabalho, utilizando o mesmo material para os discos Trilho e disco Roda, elimina o efeito da microestrutura no encruamento. Com isso, conclui-se que existam outros fatores além da microestrutura que favorecem o encruamento do disco Trilho.

Como exprimido na seção 4.1.4, as tensões residuais dos discos Trilho sempre são mais compressivas do que as apresentadas nos discos Roda. Nesse viés, a hipótese defendida, deste estudo é a de que a diferença no campo de tensões residuais apresentada entre os discos, proveniente da dinâmica de contato dos discos, possa estar contribuindo para a maior encruamento do disco do trilho. Essa hipótese é corroborada com o recente trabalho de Hu e colaboradores aprovado em uma importante revista científica na área de tribologia. Os autores também utilizaram o mesmo aço para representar o disco de trilho e o disco de roda e constataram também uma maior dureza nos disco que representam o trilho (HU *et al.*, 2023).

Por muito tempo, a dureza inicial foi considerada como uma das propriedades materiais mais significativas que afetam o desgaste (SHI *et al.*, 2022). Dessa forma, muitos estudos já foram realizados para avaliar o efeito da relação de dureza inicial do trilho e da roda no comportamento tribológico do tribossistema roda/trilho (HU *et al.*, 2020b, 2021b; LEWIS *et al.*, 2019; RAZHKOVSKIY *et al.*, 2015). Todavia, esses estudos, comumente desconsideram o efeito do ganho de dureza proveniente do encruamento e seu impacto para o desgaste dos componentes (LEWIS *et al.*, 2019).

Embora exista a necessidade de mais estudos para se compreenderem completamente os mecanismos que levaram os discos Trilho a um maior encruamento, o resultado expresso nesta tese explica em parte a menor perda de massa dos discos Trilho, como apresentado na seção 4.1.3.

#### 4.1.7 Caracterização das trincas de fadiga de contato

Após avaliação, caracterização e tratamento estatístico de mais de 2.300 trincas, somando-se os discos de todas as condições ensaiadas, os resultados são apresentados nesta seção. Na Figura 4.29 é apresentada uma micrografia com as características das trincas de FCR para o ensaio E1% Amb. No disco Trilho (A), observa-se que as trincas apresentam maior comprimento quando comparado com o disco Roda (B). Essa característica foi observada em todas as condições ensaiadas.

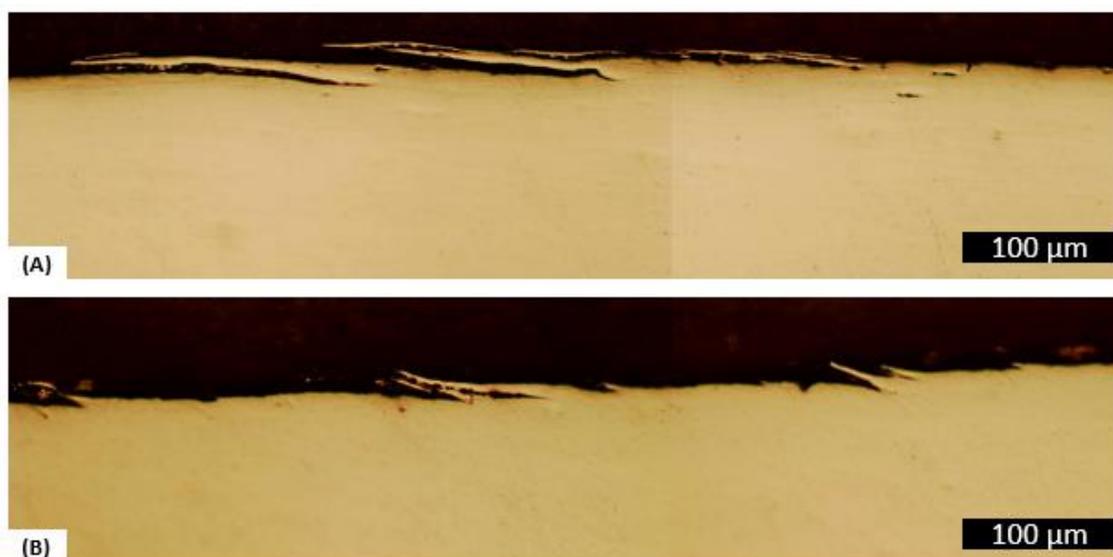


Figura 4.29 - Características das trincas de fadiga. Em (A) disco Trilho e em (B) disco Roda (imagem obtida por M.O, sem ataque químico). Fonte: Autor.

A análise de imagem é um recurso importante para auxiliar na compreensão do comportamento das trincas. Todavia, por conta do alto volume de dados analisados, é primordial o uso de ferramentas estatísticas para obtenção de resultados mais conclusivos. Assim, também para a condição de E1% Amb, é apresentado um histograma com a distribuição de todas as trincas encontradas e medidas para os discos que representam a roda e o trilho, conforme Figura 4.30.

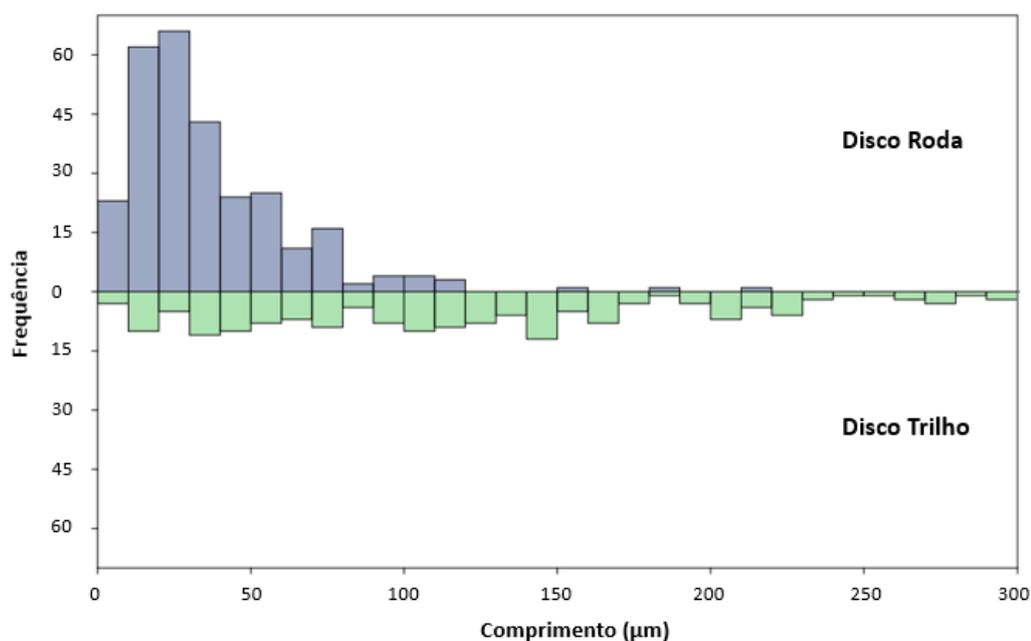


Figura 4.30 - Histograma com o comportamento do comprimento de trinca para os discos que representam a roda e o trilho no ensaio E1% Amb. Fonte: Autor.

A análise visual do histograma dá um indicativo de não normalidade dos dados. Então, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk, que é o teste estatístico para avaliar normalidade de dados, independente da distribuição e tamanho da amostra (MOHD RAZALI; BEE WAH, 2011). Todas as condições ensaiadas no ensaio disco-contra-disco foram avaliadas, e os resultados do teste são apresentados, a seguir, na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valor p-value para os testes de Shapiro-Wilk.

Condição	Disco Trilho		Disco Roda	
	Comprimento	Profundidade	Comprimento	Profundidade
E1% Amb	1,3e-14	2,2e-16	2,2e-16	2,2e-16
E3% Amb	5,7e-13	9,0e-15	7,8e-16	2,2e-16
E5% Amb	1,2e-07	1,6e-12	1,4e-09	3,9e-16

Fonte: Autor.

Como observado na Tabela 4.3 todos os conjuntos de dados testados possuem  $p\text{-value} < 0,05$ , confirmando que as características das trincas avaliadas neste trabalho apresentam distribuição não normal. O impacto desse resultado reflete-se na forma de tratar a representação da medida de tendência central e a variabilidade do conjunto de dados analisados. Na literatura, ao retratar característica de trincas, muitos autores utilizam a média e o desvio padrão como medidas de tendência central e variabilidade (HU *et al.*, 2020a; MAYA-JOHNSON; FELIPE SANTA; TORO, 2017; REZENDE *et al.*, 2020a; SANTA *et al.*, 2019). Entretanto, por essa distribuição de dados não ser normal, a interpretação e a inferência podem não ser confiáveis ou válidas.

Dessa forma, os dados apresentados neste estudo serão sumarizados em termos da mediana e quartis, que são medidas de tendência central e variabilidade mais adequadas quando se tem uma distribuição não normal. Para o leitor não familiarizado, o *boxplot* é uma representação gráfica, no qual os resultados são apresentados em quartis. A reta vertical na parte inferior se estende entre o limite inferior dos dados até o primeiro quartil. Ou seja, significa que 25% dos dados se encontram nessa região do gráfico. O primeiro retângulo é a distância entre o primeiro quartil até a mediana, o segundo retângulo é a distância entre a mediana e o terceiro quartil. Por fim, a reta vertical superior representa os dados compreendidos entre o terceiro quartil e o limite superior, conforme observado na Figura 4.31.

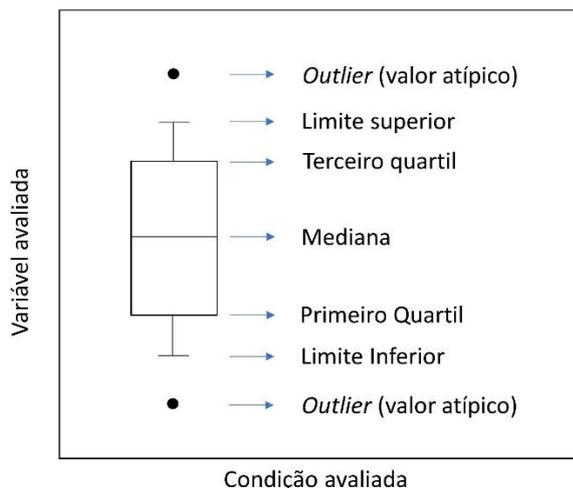


Figura 4.31 - Elementos de um *boxplot*. Fonte: Autor.

Na Figura 4.32, é apresentado o *boxplot* com os dados de comprimento de trincas para o disco Trilho com a presença dos *outliers*. Esse gráfico mostra que caracterizar as trincas de FCR em função do comprimento máximo das trincas pode levar a conclusões equivocadas, uma vez que essas trincas normalmente são valores atípicos e não possuem representação estatística.

Provavelmente, as trincas classificadas como *outliers* possuem mecanismo de formação distinto. Isso ocorre, pois a nucleação das trincas possuem diferentes origens, como na superfície, subsuperfície e no interior do material. Na superfície, as trincas são resultadas do processo de *ratcheting*, e, uma vez iniciadas, elas se propagam em um ângulo raso em relação à superfície. Na subsuperfície e no interior do material, a origem dessas trincas ocorre pela presença de inclusões ou outros defeitos do material, e normalmente essas trincas possuem grandes comprimentos (EKBERG; KABO; ANDERSSON, 2002). O foco deste trabalho são as trincas que ocorrem como resultado do processo de *ratcheting*.

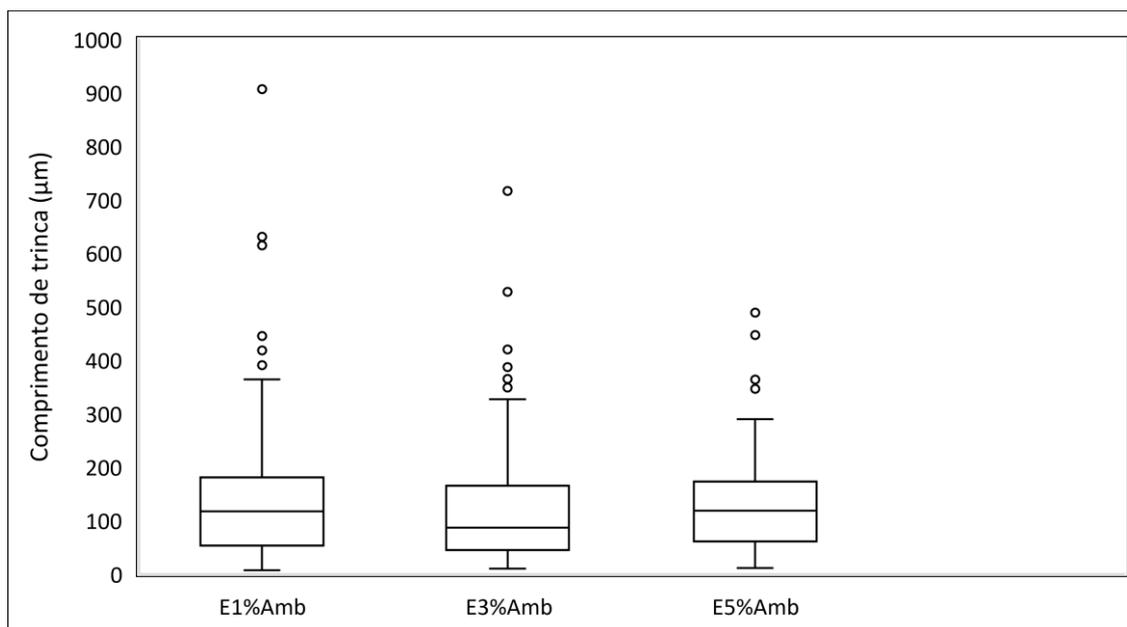


Figura 4.32 - Comprimento de trinca disco Trilho com a presença dos outliers para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamentos realizados em temperatura ambiente. Fonte: Autor.

Neste trabalho, todas as características das trincas serão apresentadas sem os outliers. Assim, na Figura 4.33 são apresentados os dados do comprimento das trincas dos discos Trilhos para todas as condições de escorregamento. Ao analisar a referida figura observa-se que houve uma redução no comprimento da trinca em função do aumento do escorregamento. Esses resultados mostram que para baixo escorregamento há predominância de FCR com maior propagação das trincas. Para maiores escorregamento, com a maior taxa de desgaste, ocorre a remoção de material da região da superfície, removendo parcialmente as trincas superficiais, neutralizando, portanto, a propagação de trincas, o que evidencia uma competição entre FCR e desgaste (DONZELLA *et al.*, 2005; ZHOU *et al.*, 2021).

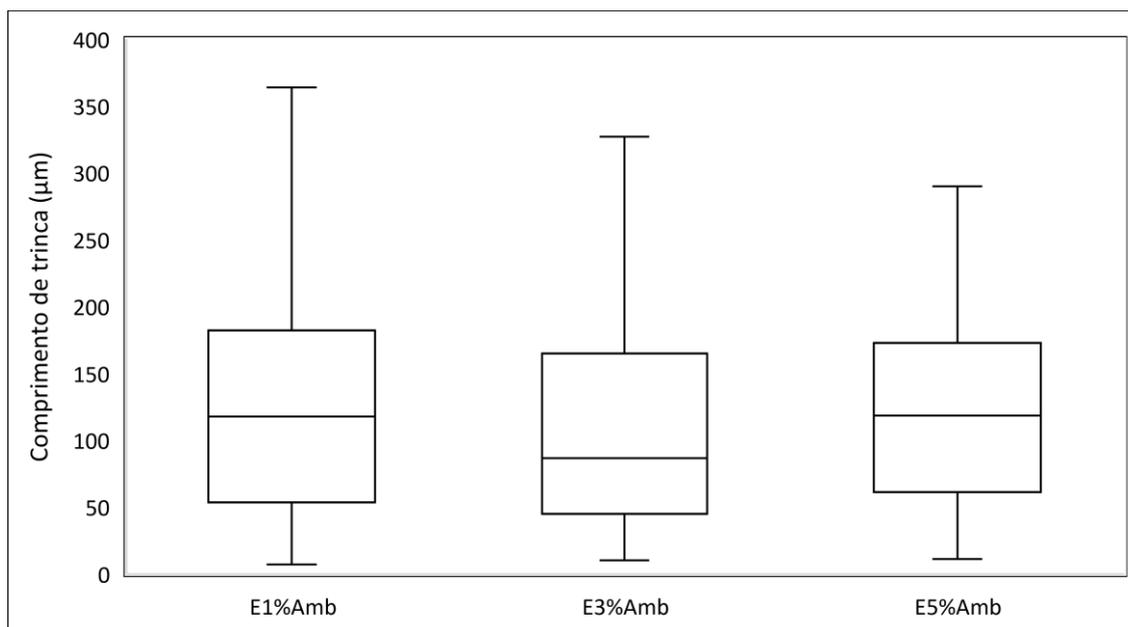


Figura 4.33 - Comprimento de trinca disco Trilho sem a presença dos *outliers* para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamentos realizados em temperatura ambiente. Fonte: Autor.

Os resultados do efeito do escorregamento na profundidade das trincas nos discos Trilho são apresentados na Figura 4.34. Com o aumento do escorregamento, houve a propagação de trincas em maiores profundidades. Estudos já realizados explicam esse comportamento com base na presença de maiores tensões de cisalhamento na superfície, proporcionando a propagação das trincas para maiores profundidades e em maiores ângulos de propagação (LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004; RODRÍGUEZ-ARANA *et al.*, 2022). Comportamento similar foi observado por (MA *et al.*, 2016), que identificou uma relação direta entre o escorregamento com profundidade e o ângulo de trinca, principalmente quando o escorregamento utilizado levava a um mecanismo de desgaste severo.

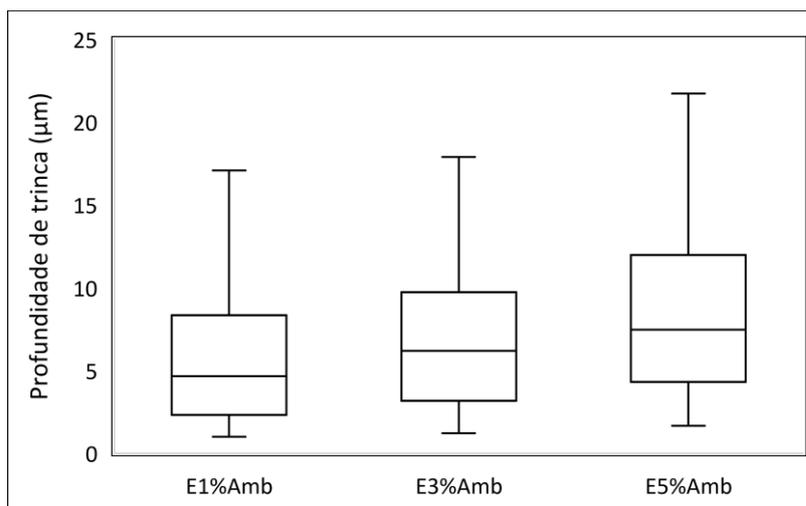


Figura 4.34 - Profundidade de trinca do disco Trilho para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamentos realizados em temperatura ambiente. Fonte: Autor.

Na Figura 4.35, é apresentado o efeito do escorregamento na abertura das trincas para o disco Roda. Se para o disco Trilho foi identificada uma relação inversa entre escorregamento e comprimento de trinca, no disco Roda o comportamento acontece de forma oposta. À medida que o escorregamento aumenta, observam-se trincas com maiores comprimentos. A explicação para isso é a reversão das tensões residuais da superfície dos discos Roda, que foi discutido na seção 4.1.4. Embora ainda exista a competição entre FCR e desgaste, as tensões residuais trativas na superfície atuam promovendo a abertura das trincas, prevalecendo sobre a remoção do comprimento de trinca em função do desgaste dos discos.

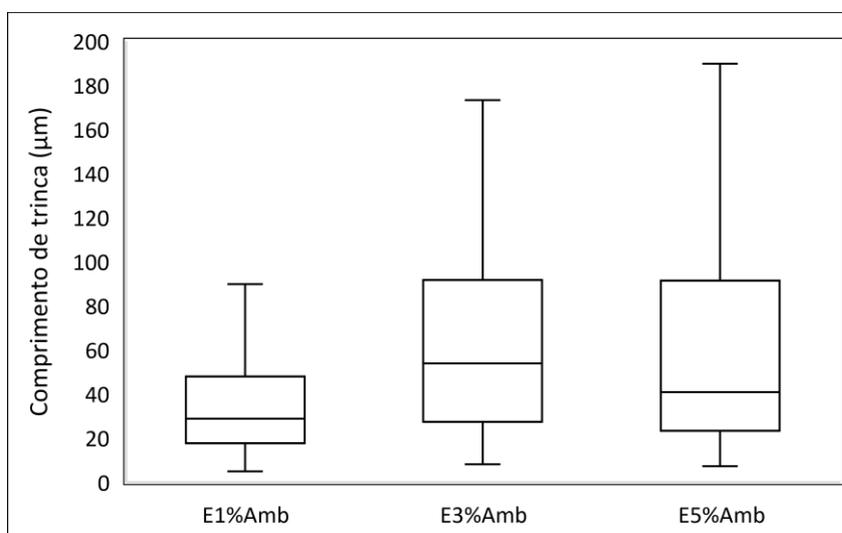


Figura 4.35 - Comprimento de trinca disco Roda para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamentos realizados em temperatura ambiente. Fonte: Autor.

Na Figura 4.36, é apresentado o resultado da profundidade das trincas para o disco Roda. Em relação à profundidade das trincas, nota-se as menores profundidades de trincas para a condição com 1% de escorregamento e as maiores profundidades de trincas foram encontradas com a condição de 3% de escorregamento. Esse resultado está alinhado aos resultados de perda de massa, seção 4.1.3. Os discos Roda que mais perderam massa foram os dos ensaios realizados com 3% de escorregamento. Dessa forma, esse resultado evidencia que, para a condição de 1 e 3% de escorregamento, a perda de massa parece ser influenciada pelo mecanismo de desgaste por FCR, ao passo que 5% de escorregamento, conforme observado nas imagens de MEV, seção 4.1.5.3, parece haver predominância de desgaste abrasivo.

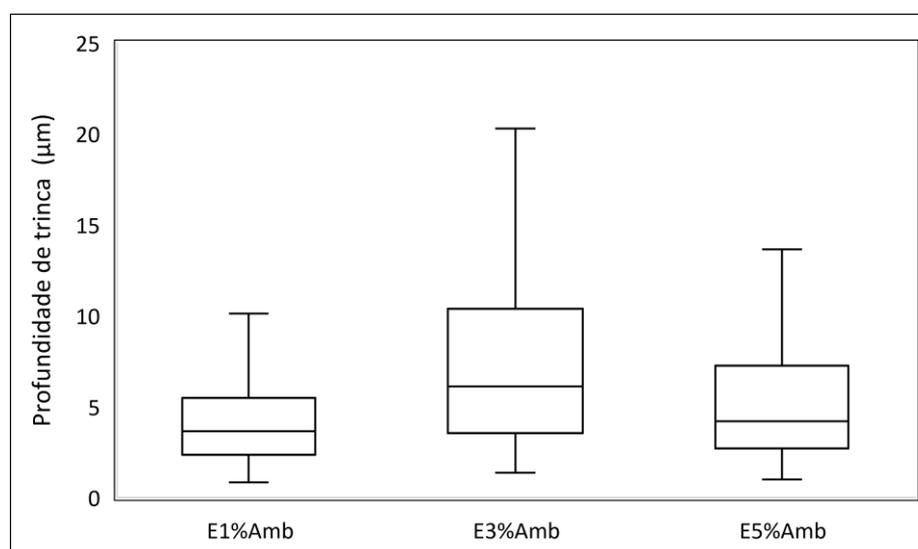


Figura 4.36 - Profundidade das trincas disco Roda para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamentos realizados em temperatura ambiente. Fonte: Autor.

Todavia, é importante destacar, como ressaltado por diferentes trabalhos, a definição do mecanismo de desgaste governante é complexa e isso foi observado ao se avaliarem os discos Roda (SANTA *et al.*, 2019; SEO *et al.*, 2014; ZHOU *et al.*, 2016). Neste trabalho, identificou-se sobre eles atuação simultânea de FCR, reações triboquímicas e abrasão.

Uma vez avaliados o comprimento e profundidade das trincas, que são informações relacionadas a sua propagação, apresentam-se agora informações sobre a densidade das trincas, que traz dados sobre a nucleação dessas trincas. A densidade de trinca dos discos Trilho e Roda para todas as condições ensaiadas é apresentada na Figura 4.37. Essa característica da trinca foi

avaliada contando-se a quantidade de trincas por unidade de comprimento conhecido do corpo de prova.

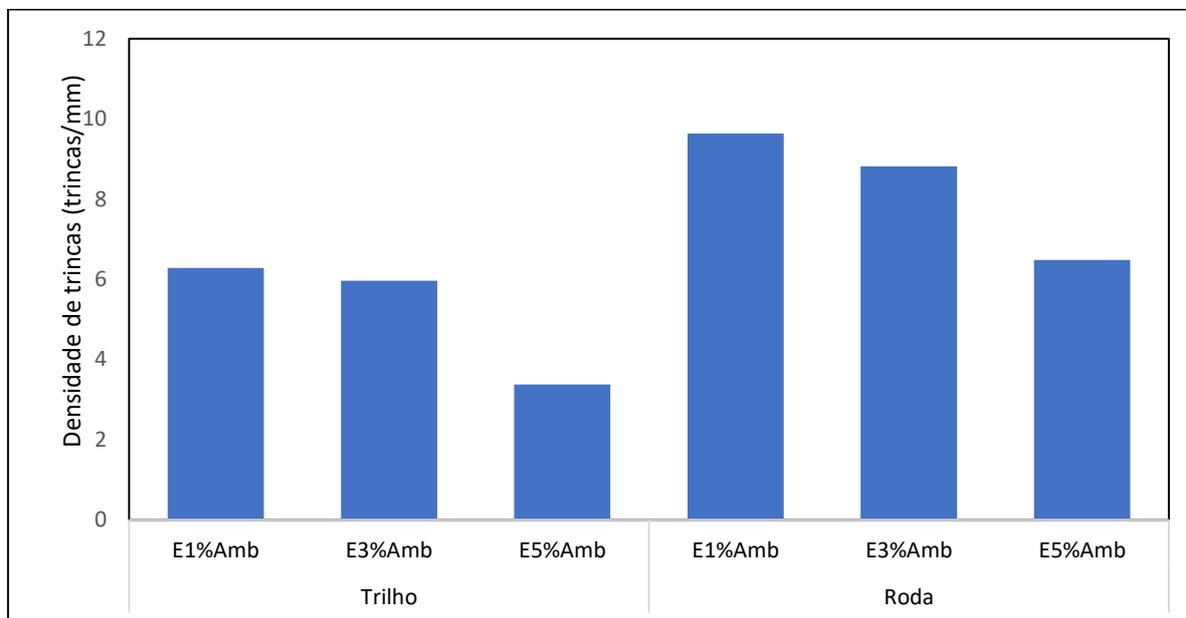


Figura 4.37 - Densidade de trincas para os discos Trilho e os discos Roda para os ensaios conduzidos à temperatura ambiente com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

Quanto à influência do escorregamento, fica evidenciado que, para maior escorregamento, acontece uma redução na densidade de trinca dos discos. Para os ensaios realizados à temperatura ambiente, a redução é de 32% quando comparados os ensaios realizados com 1 e 5% de escorregamento. Essa redução de densidade pode estar correlacionada mais uma vez com o efeito da competição entre fadiga de contato e desgaste (DONZELLA *et al.*, 2005; ZHOU *et al.*, 2021).

Ao comparar a densidade de trinca entre o disco Trilho e Roda, observa-se um menor número de trincas nucleadas nos discos Trilho. Uma hipótese para esse comportamento são as tensões superficiais apresentadas em cada tipo de disco. As tensões residuais mais trativas na superfície dos discos Roda atuam favorecendo o processo de nucleação de novas trincas.

Outro ponto que merece atenção quanto aos estudos das trincas de fadigas de contato é o seu impacto na perda de massa do material. Isso ocorre, pois, ao final da propagação das trincas elas se destacam do material gerando os debris. Na Figura 4.38, é possível observar o momento em que ocorre o início do destacamento da ponta da trinca gerando um fragmento (debris) metálico, condição observada do disco Roda no ensaio E1%Amb.

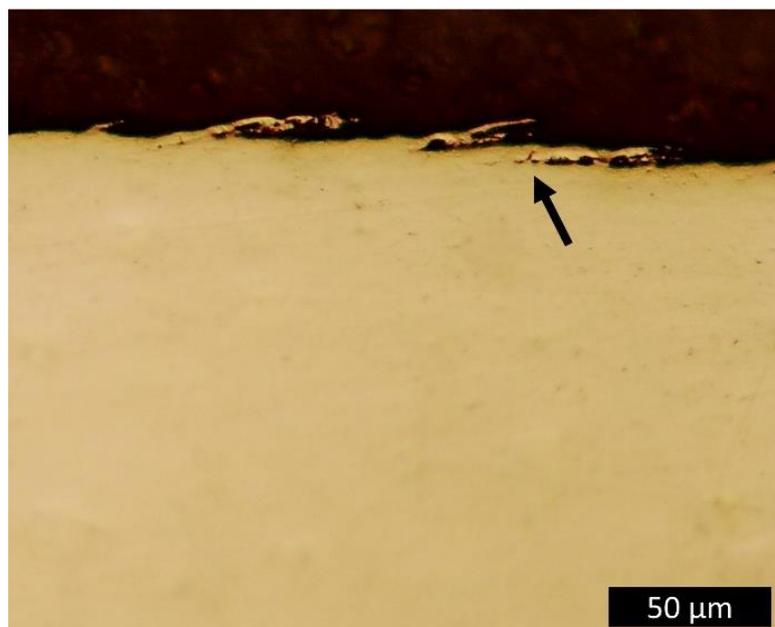


Figura 4.38 - Processo de geração de debris do disco Roda no ensaio E1% Amb (imagem obtida por M.O, sem ataque químico). Fonte: Autor.

O mecanismo de formação de debris foi apresentado de maneira esquemática por Ding e colaboradores(2016). A explicação fundamenta-se na microestrutura formada por ferrita-perlita, que com o processo de deformação plástica que ocorre ao longo do ensaio disco-contra-disco, gera uma deformação da ferrita em formas de finas linhas, em virtude de seu baixo limite de escoamento. Assim, as trincas de FCR propagam-se nas linhas de ferritas, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 4.39 (A). Após vários ciclos, inicia-se uma nova trinca no material acima da trinca de FCR (B), que depois da propagação e fratura da trinca, resulta na remoção de material, gerando o debris (C) (DING *et al.*, 2016).

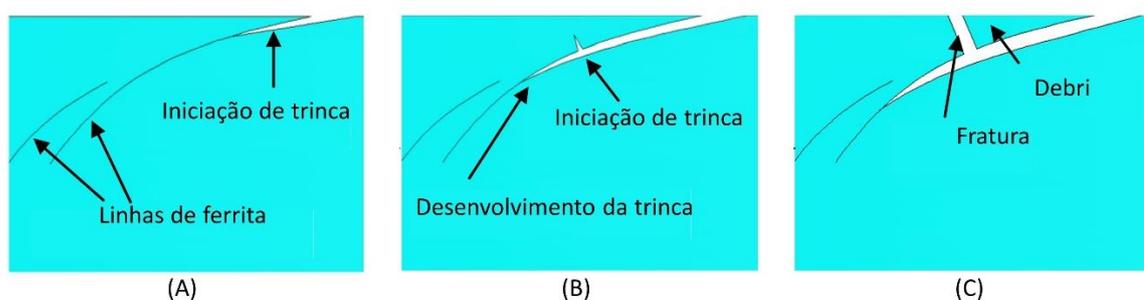


Figura 4.39 - Formação dos debris para aços de rodas com microestrutura ferrita - perlita. Fonte: Adaptado de Ding *et al.* (2016).

#### 4.1.8 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os principais resultados obtidos nesta tese para que se possa ter uma compreensão do efeito do escorregamento no comportamento tribológico dos aços de rodas classe C. Assim, na Figura 4.40 e na Figura 4.41 é expresso o efeito do escorregamento no comportamento tribológico do disco Roda e do disco Trilho para os ensaios realizados à temperatura ambiente, respectivamente. Para a compreensão do gráfico informa-se que os valores de todas as variáveis foram normalizados.

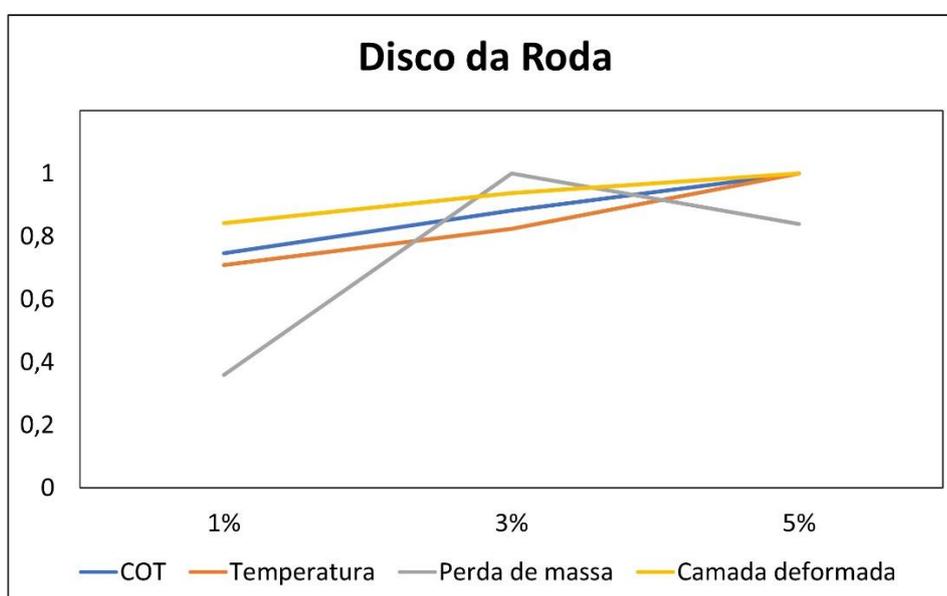


Figura 4.40 - Efeito do escorregamento no comportamento tribológico do disco Roda para ensaios realizados sem controle de temperatura. Fonte: Autor.

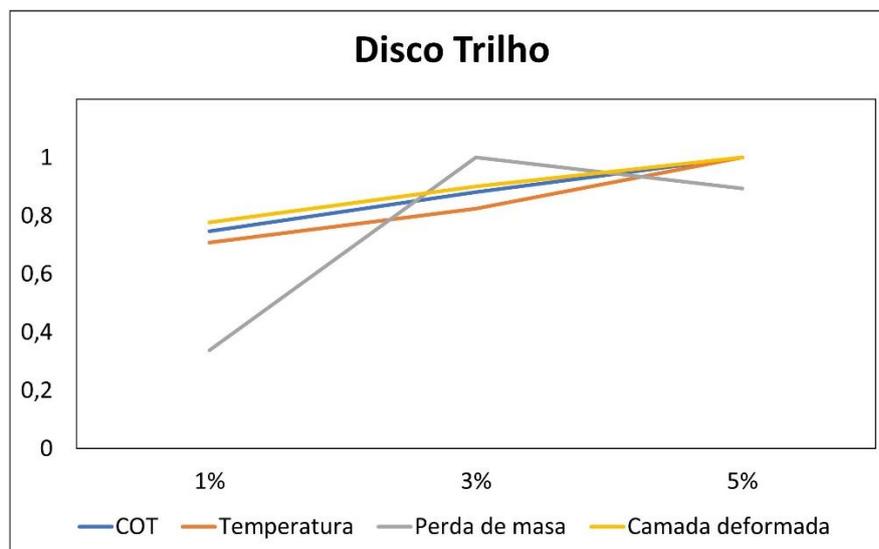


Figura 4.41 - Efeito do escorregamento no comportamento tribológico do disco Trilho para ensaios realizados sem controle de temperatura. Fonte: Autor.

Para ambos os discos, identificou-se que o aumento do escorregamento provocou um incremento do COT devido à ampliação da área de deslizamento no contato entre os discos (CARTER, 1926), o que está detalhado na seção 4.1.1. O aumento do COT, por sua vez, promoveu maior geração de calor pelo atrito entre os discos, elevando a temperatura na superfície do disco (BHUSHAN, 2000). Resultados similares foram encontrados na literatura (GALLARDO-HERNANDEZ; LEWIS; DWYER-JOYCE, 2006; LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004), ver detalhes na seção 4.1.2.

O incremento do COT em função do escorregamento promove também uma elevação da força tangencial e na tensão de cisalhamento, que se deslocou da subsuperfície para a superfície, gerando encruamento em maiores profundidades, elevando a camada deformada (HU *et al.*, 2021a), conforme explicado na seção 4.1.6.1. Os resultados encontrados, neste trabalho, estão em consoância com os trabalhos de Hu *et al.* (2020a) e Ma *et al.* (2016).

Em relação à perda de massa dos discos, observou-se um aumento na perda de massa alterando-se o escorregamento de 1 para 3%. Isso ocorre, pois, à medida que o escorregamento aumenta, com a ampliação da área de deslizamento no contato, a tensão de cisalhamento na superfície aumenta, elevando a profundidade das trincas que conduzirá maiores debris e, por conseguinte, maior perda de massa, gerando, assim, um desgaste crescente (LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004; RODRÍGUEZ-ARANA *et al.*, 2022). Para as duas condições, o mecanismo de desgaste atuante foi o *Ratcheting*; (ver seção 4.1.5).

A presença de *ratcheting* é comumente relatado na literatura como causa principal da perda de massa dos componentes ferroviários, quando estes são estudados utilizando o tribômetro disco-contra disco com baixo escorregamento (FANTECELLE STREY *et al.*, 2021; MA *et al.*, 2016; MIRANDA *et al.*, 2022; REZENDE *et al.*, 2020a; WANG *et al.*, 2017a; ZHOU *et al.*, 2016).

Todavia, com a alteração de 3 para 5% escorregamento houve uma alteração no mecanismo, de desgaste; seção (4.1.5.3), com a predominância de desgaste abrasivo. Nesse mecanismo a remoção do material passa a ocorrer pela interação das partículas de óxidos e debris com a superfície dos discos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014). Tal leve redução de perda de massa pode estar associada a essa alteração no mecanismo de desgaste. A transição de mecanismo de desgaste em função do aumento de escorregamento já foi observada por Zhou e colaboradores ao conduzirem ensaios disco-contra-disco com 9% de escorregamento (ZHOU *et al.*, 2016).

## 4.2 EFEITO DO ESCORREGAMENTO NAS CONDIÇÕES TRIBOLÓGICAS NOS ENSAIOS REALIZADOS A 60 °C.

Neste segmento, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados a 60 °C a fim de compreender o efeito do escorregamento no coeficiente de atrito, na perda de massa, na tensão residual dos discos, nos mecanismos de desgaste, na camada deformada, dureza superficial e nas características das trincas de fadiga de contato para os ensaios com controle de temperatura e identificar o efeito da temperatura nas características tribológicas do aço de roda classe C.

### 4.2.1 COEFICIENTE DE ATRITO

Os resultados do COT para os ensaios realizados à temperatura de 60 °C são apresentados, a seguir, na Figura 4.42. No gráfico, é possível observar um comportamento similar ao observado nos ensaios à temperatura ambiente. Entretanto, ressalta-se que o aumento de temperatura reduziu a dispersão do COT, especialmente para a condição de 5% de escorregamento.

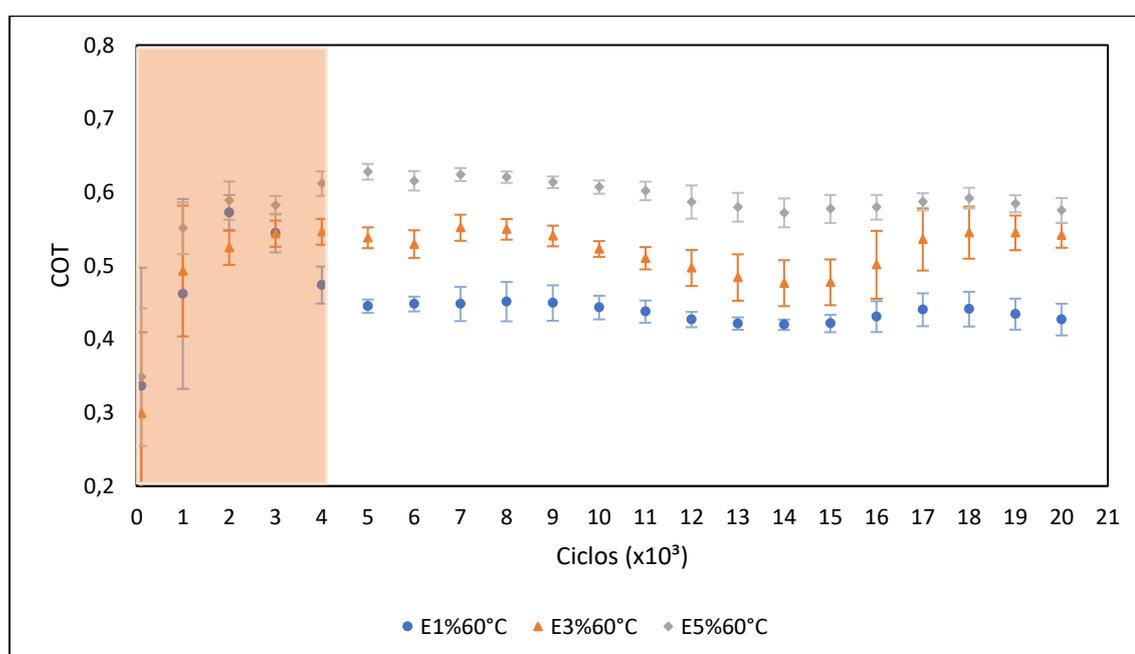


Figura 4.42 - Curva de coeficiente de atrito ao longo do ensaio para condições com 1, 3 e 5% de escorregamento realizados a 60 °C. Fonte: Autor.

O valor global de COT para os ensaios realizados a 60 °C é apresentado na Figura 4.43. Nessa mesma figura, são apresentados os resultados dos ensaios conduzidos à temperatura ambiente, permitindo avaliar de maneira mais clara o efeito da temperatura no COT.

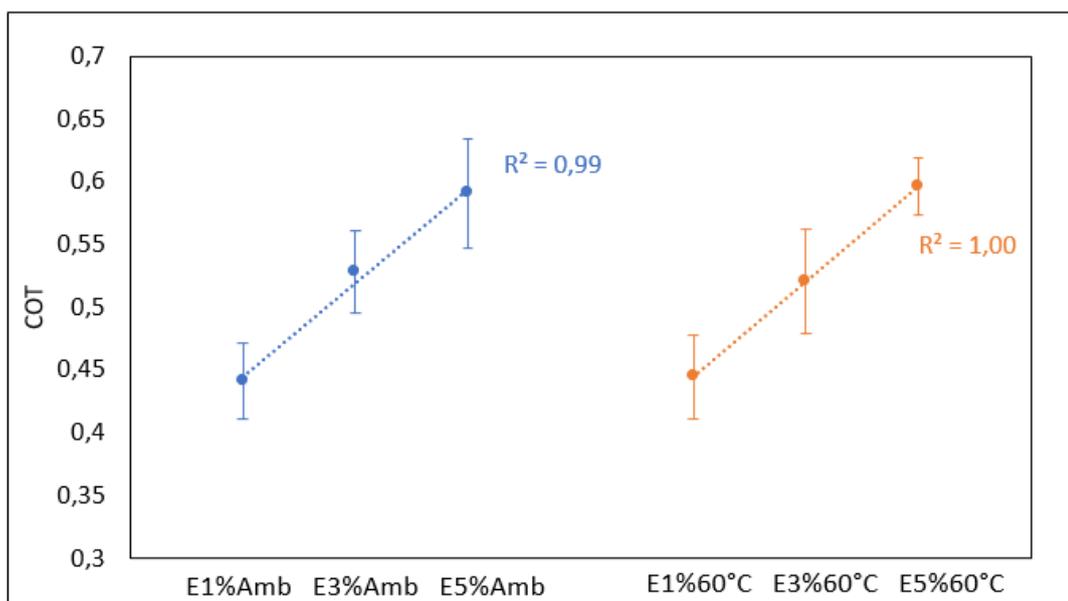


Figura 4.43 - Curva de Carter para os ensaios realizados à temperatura ambiente e para os ensaios conduzidos a 60 °C. Fonte: Autor.

Ao avaliar a Figura 4.43, pode-se concluir que a temperatura de 60 °C foi capaz de promover mudanças significativas no COT. Shen e colaboradores ao conduzirem experimentos com tribômetro disco-contra-disco em um ambiente controlado a 60 °C verificaram um COT entre 0,44 e 0,51 para os ensaios realizados com 5% de escorregamento, valor menor ao observado neste trabalho. No entanto, ressalta-se que os estudiosos mensuraram a temperatura na câmara climática e não na superfície dos discos, conforme metodologia adotada neste trabalho. Somase, ainda, o fato de terem adotado tensão máxima de contato de 1200 MPa, enquanto, neste trabalho, foi adotado 2200 MPa de pressão máxima de contato. Essa diferença metodológica na mensuração da temperatura e a menor tensão máxima de contato podem ter conduzidos para um COT menor ao observado neste estudo (SHEN *et al.*, 2022).

#### 4.2.2 TAXA DE DESGASTE

Os resultados de perda de massa em função do escorregamento para os ensaios realizados a 60 °C são apresentados na Figura 4.44. Verifica-se um aumento na perda de massa com a elevação do COT de 1 para 3% de escorregamento, seguido da queda de perda de massa com o aumento do COT de 3 para 5% de escorregamento. Um comportamento similar ao observado nos ensaios realizados à temperatura ambiente.

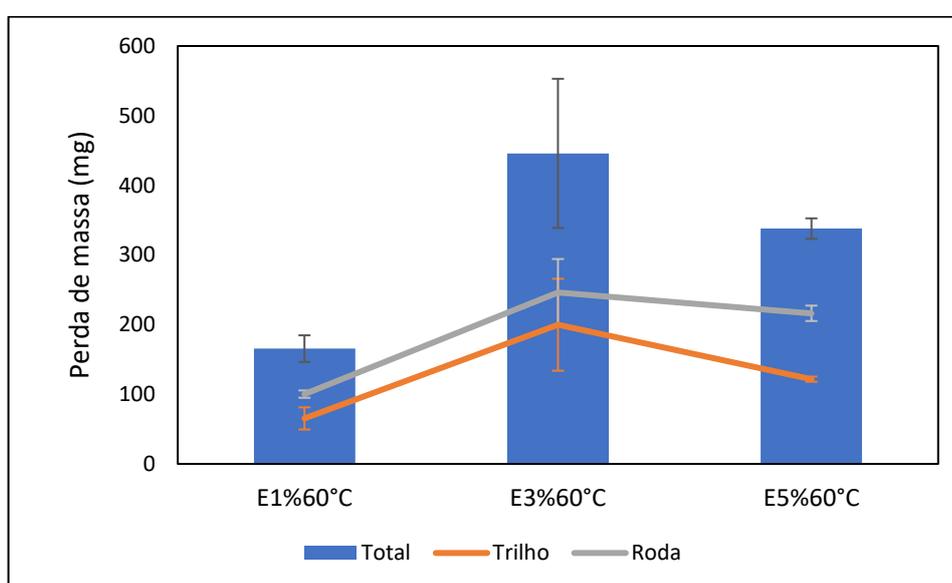


Figura 4.44 - Perda de massa em função do escorregamento para os ensaios realizados a 60 °C. Fonte: Autor.

Todavia, dois pontos merecem destaque ao avaliar a Figura 4.44. Primeiro é o alto desvio padrão apenas na condição de 3% de escorregamento, o que pode ter ocorrido por ser uma região de transição. Na tribologia, é comum a presença de desvio padrão alto, em função das transições de mecanismos atuantes e à complexidade dos tribossistemas. Maya-Johnson e colaboradores (2017), ao estudarem o comportamento de desgaste a seco de aços ferroviários (R370CrHT) sob condições de Fadiga de Contato de Rolamento, observaram um desvio padrão de até 33% na perda de massa (MAYA-JOHNSON; FELIPE SANTA; TORO, 2017). O segundo ponto é que a redução da perda de massa entre a condição 3 e 5% de escorregamento é potencializada pela redução de perda de massa do disco Trilho, observando uma redução de perda de massa de 39%. Esse comportamento será mais precisamente elucidado nas análises seguintes.

Para melhor compreender o efeito da temperatura na taxa de desgaste do aço de roda classe C, é apresentado, na Figura 4.45, um comparativo entre os resultados obtidos à temperatura ambiente com os obtidos com os ensaios sendo conduzidos a 60 °C.

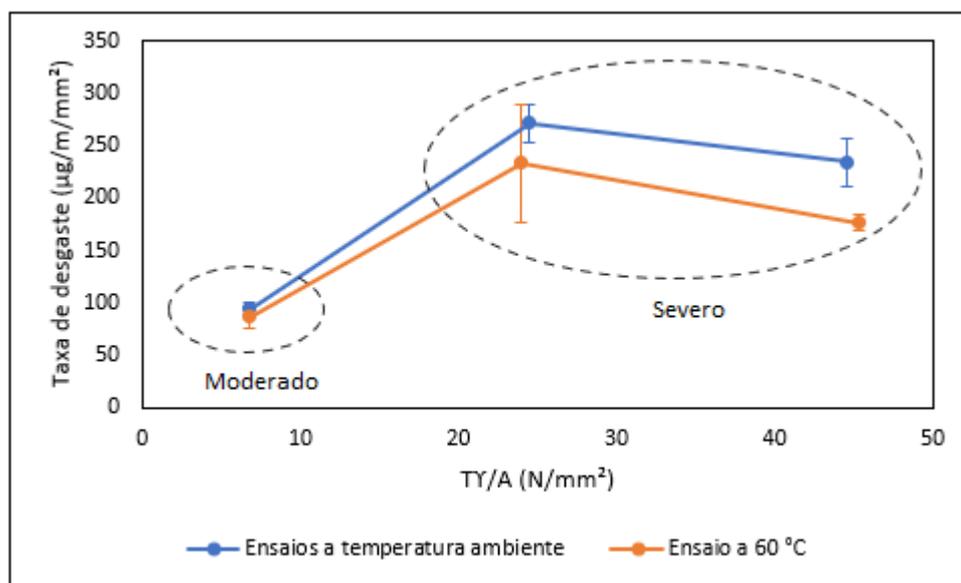


Figura 4.45 - Taxa de desgaste em função de  $Ty/A$  evidenciando os regimes de desgastes presentes nos ensaios realizados à temperatura ambiente e a 60 °C. Fonte: Autor.

Ao avaliar a Figura 4.45, observa-se que os ensaios realizados a 60 °C apresentam uma curva com comportamento similar ao apresentado à temperatura ambiente. Isso pode indicar que a temperatura de 60 °C, que é uma comumente observada nas ferrovias (CASSARO, 2017), não é capaz de deslocar as regiões de estabilidade dos regimes de desgaste.

Em contrapartida, foi observado o efeito da temperatura na taxa de desgaste do tribossistema simulado em função do regime de desgaste predominante. Como observado na Figura 4.45, quando se tem um regime de desgaste moderado, os valores de perda de massa dos ensaios realizados à temperatura ambiente e a 60 °C são iguais estatisticamente. Contudo, no regime severo, a temperatura atua provocando uma redução na taxa de desgaste, em especial para a condição com 5% de escorregamento.

Ao buscar um paralelo com a literatura, foram encontrados poucos trabalhos que avaliam o efeito da temperatura no comportamento tribológico dos componentes ferroviários utilizando disco-contra-disco. A maior parte desses trabalhos concentra-se em estudar o efeito das temperaturas nos rigorosos invernos enfrentados na China. Assim, Zhou e colaboradores (2022)

avaliaram o efeito da temperatura ambiente abaixo de 0 °C. Os autores observaram uma redução da taxa de desgaste de quase 50% quando se reduziu a temperatura de ensaio de 20 °C para -40 °C. A queda da taxa de desgaste foi acompanhada pela redução do coeficiente de atrito. Os autores também observaram maior desgaste no disco Roda em relação ao disco do trilho (ZHOU *et al.*, 2022). Shi e colaboradores (2018) também realizaram ensaio em baixa temperatura, mas limitaram o estudo a avaliar o efeito de baixa temperatura no coeficiente de atrito roda/trilho (SHI *et al.*, 2018)

Shen e colaboradores por sua vez, avaliaram o comportamento do aço de roda ER8, com dureza de 285 HV<sub>0,5</sub> em diferentes temperaturas atingindo até a temperatura de 60 °C. Os ensaios foram realizados com 5% de escorregamento, pressão de contato de 1280 MPa e velocidade de rotação de 525 RPM para o disco Roda. Os autores observaram uma redução na perda de massa de 0,043 para 0,029 gramas para o disco Roda, alterando-se a temperatura do ensaio de 40 para 60 °C (SHEN *et al.*, 2022). A redução da perda de massa foi atribuída à presença de óxidos escuros (Magnetita) que formaram uma camada de lubrificante sólido.

### 4.2.3 Tensão residual

O comportamento das tensões residuais para os ensaios realizados a 60°C é apresentado na Figura 4.46. Como os resultados obtidos foram similares ao observado nos ensaios realizados à temperatura ambiente, optou-se por apresentar esses resultados em gráficos comparativos entre os ensaios à temperatura ambiente e os ensaios realizados a 60 °C, buscando identificar contrapontos e visualizar o efeito da temperatura nas tensões residuais.

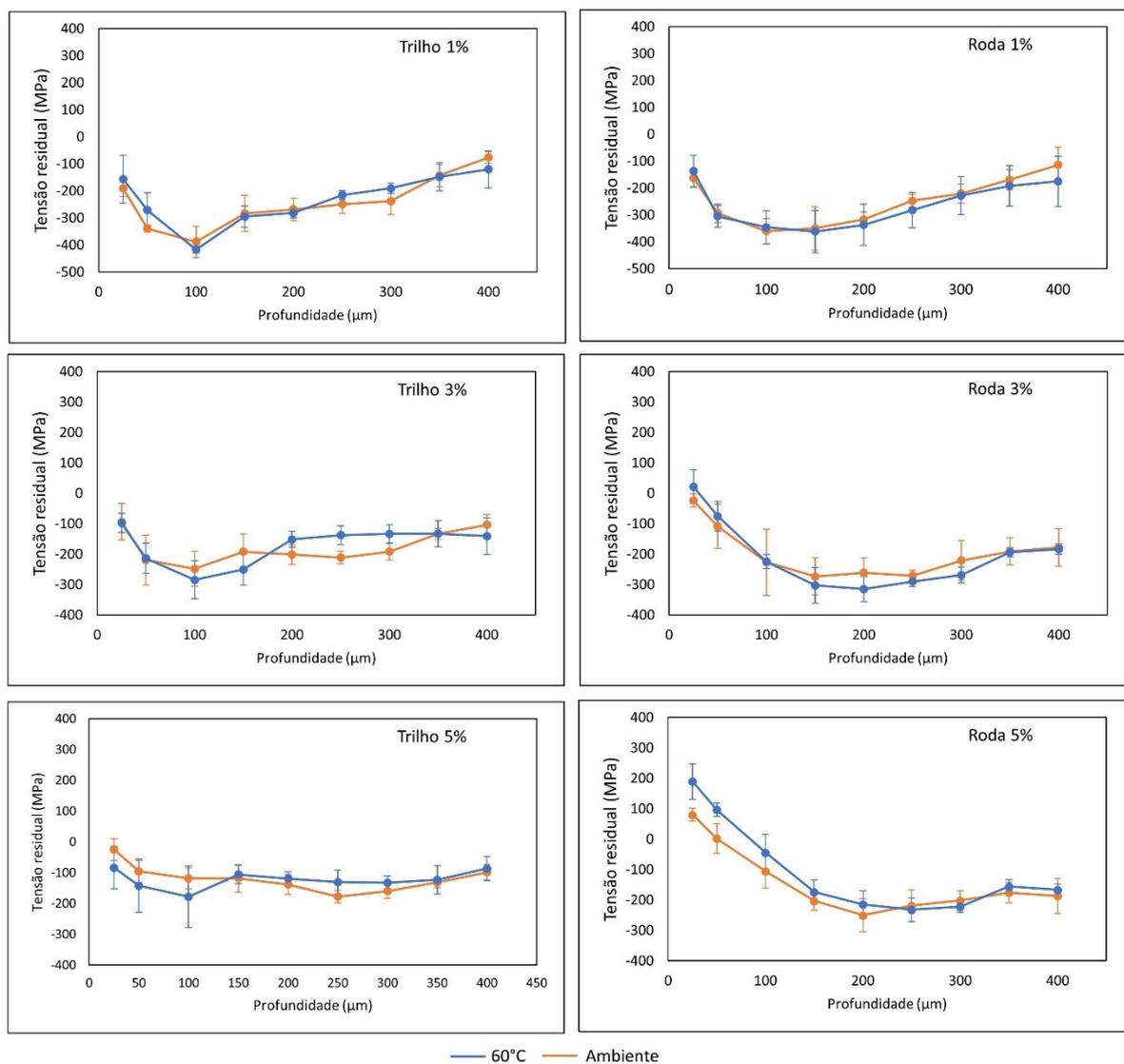


Figura 4.46 - Comparativo efeito da temperatura na tensão residual para os discos Trilho e Roda nos ensaios realizados com 1,3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

Ao analisar a Figura 4.46, identifica-se o efeito da temperatura nos ensaios que ocorreram a 5% de escorregamento, em especial no disco Roda. A justificativa para essa redução é apresentada, em seguida, na Figura 4.47, que apresenta os resultados da tensão residual por tensão de cisalhamento.

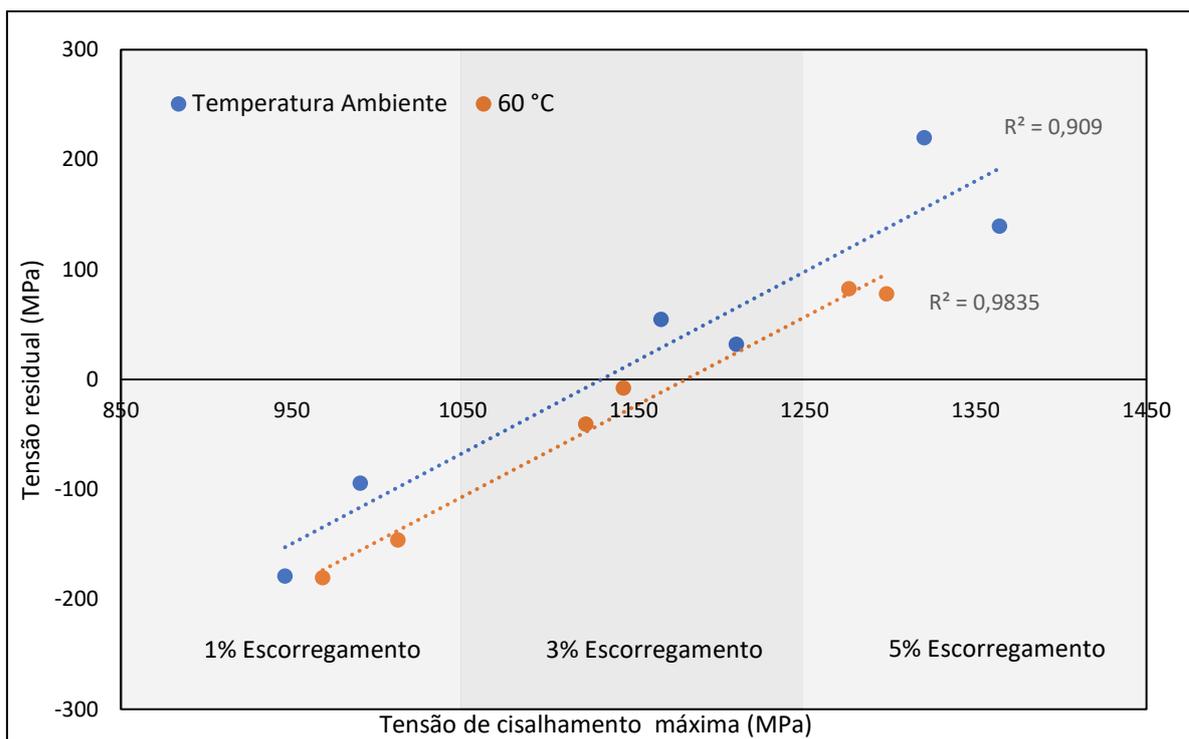


Figura 4.47 - Efeito da temperatura na tensão residual de cisalhamento e na tensão residual para os discos Roda observados a 25  $\mu\text{m}$  da superfície. Fonte: Autor.

A temperatura atua reduzindo a tensão de cisalhamento máxima para os ensaios com 3 e 5%, sendo este efeito mais acentuado nos ensaios com 5% de escorregamento. Essa redução da tensão de cisalhamento levou a uma redução da tensão residual.

#### 4.2.4 Análise superficial dos discos

As superfícies dos discos foram avaliadas por análise por espectrometria Raman, por imagens captadas por microscópio ótico estereoscópico e por MEV, mantendo-se as mesmas técnicas adotadas nos ensaios conduzidos à temperatura ambiente.

##### 4.2.4.1 Avaliação dos óxidos formados por Espectrometria Raman

Na Figura 4.48 e na Figura 4.49 são apresentados os espectros Raman para os discos Trilho e Roda para os ensaios realizados a 60 °C, respectivamente. Conforme pode ser observado, é identificada a presença de Hematita, Magnetita e Goetita, não havendo a formação de nenhum óxido ou hidróxido diferente dos observados nos ensaios à temperatura ambiente.

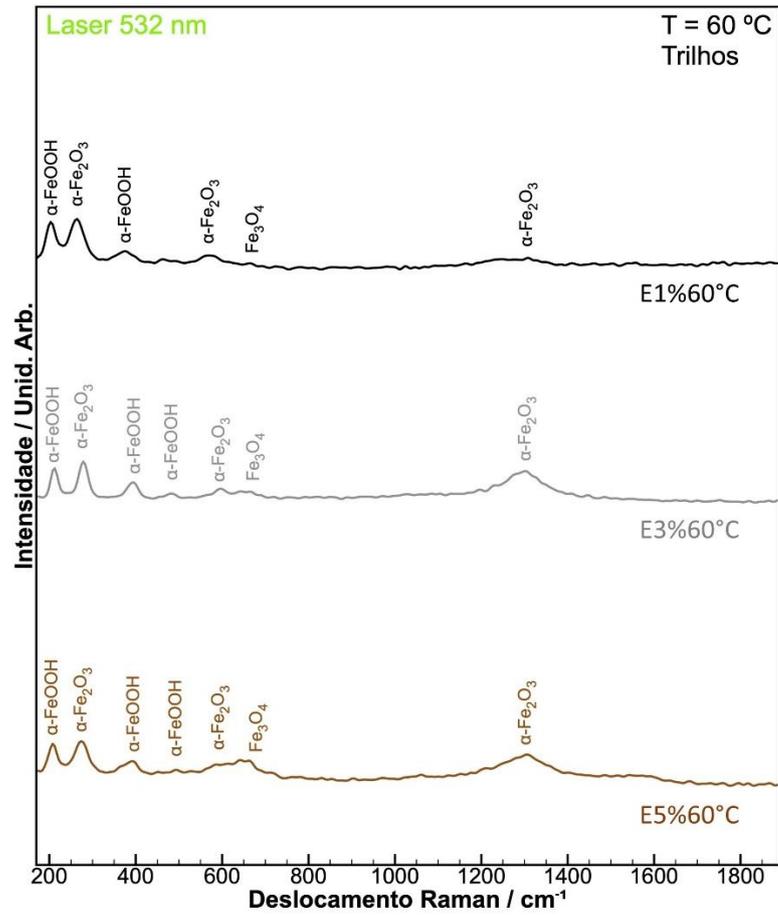


Figura 4.48 - Espectros Raman para os discos Trilho para os ensaios realizados a 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

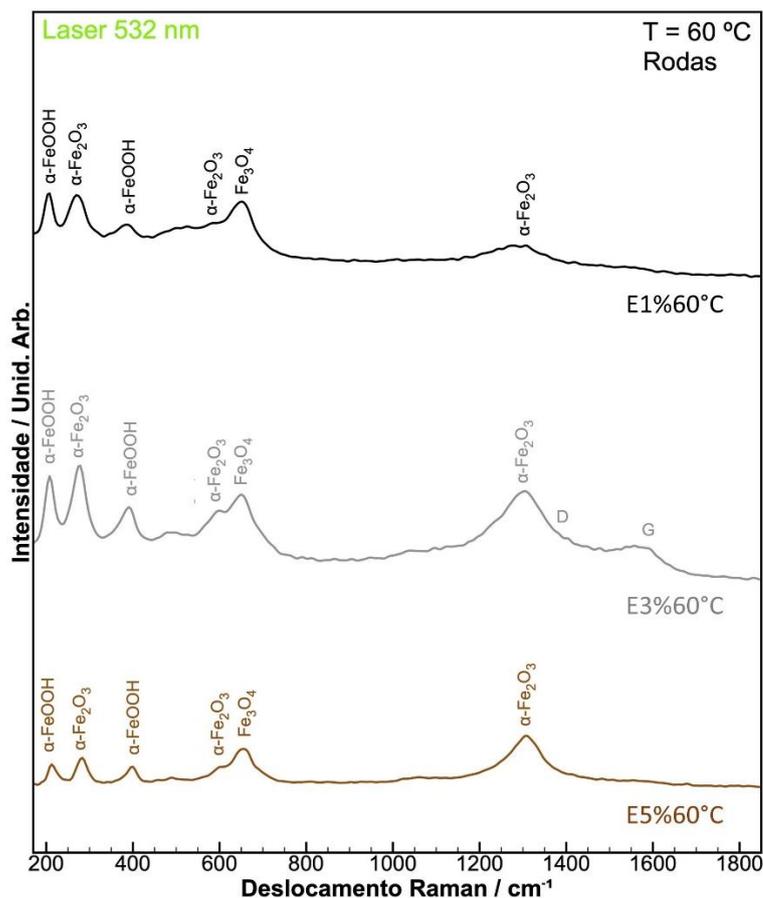


Figura 4.49 - Espectros Raman para os discos Roda para os ensaios realizados a temperatura de 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

Esses resultados indicam que a temperatura de 60 °C de ensaios não foi suficiente para alterar os produtos de corrosão nos ensaios disco-contra-disco.

#### 4.2.4.2 Análise por Microscopia Ótica estereoscópica

Nos ensaios realizados a 60 °C, observa-se que a superfície dos discos Trilho apresenta características similares aos exibidos nos ensaios à temperatura ambiente, com a presença de marcas de corrugação por ressonância para os ensaios realizados em 1% e a existência de uma coloração consistente com a influência de óxido de ferro, Figura 4.50. Entretanto, comparando-se aos ensaios realizados à temperatura ambiente, tanto a presença da corrugação como a presença de óxido na superfície são mais discretas.

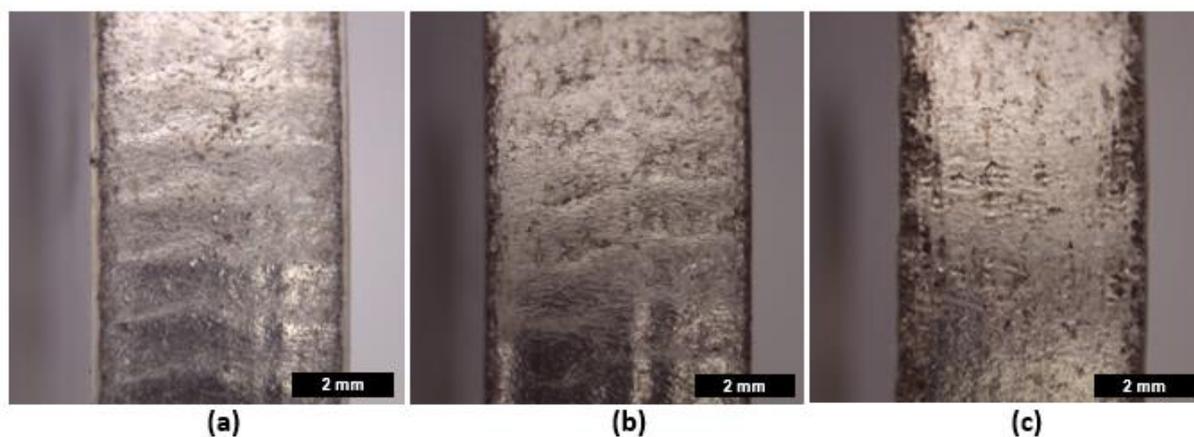


Figura 4.50 - Características superficiais dos discos Trilho. Em (a) condição de ensaio E1%60°C, em (b) E3%60°C e em (c) E5%60°C (imagem obtida por microscopia estereoscópica, sem ataque químico). Fonte: Autor.

Na Figura 4.51 são apresentadas as características da superfície dos discos Roda que foram ensaiados a 60 °C. Constata-se a presença de óxidos em todas as condições de escorregamento, uma característica similar à apresentada nos ensaios à temperatura ambiente; (ver Figura 4.21). No entanto, enfatiza-se que, para os ensaios realizados com 3 e 5% de escorregamento, não são observadas grandes regiões com destacamento de óxido, sugerindo uma maior formação e estabilidade da camada de óxido na superfície do disco com o aumento da temperatura. He e colaboradores perceberam também uma maior intensidade para o processo de tribocorrosão com o aumento de temperatura dos discos (HE *et al.*, 2016)

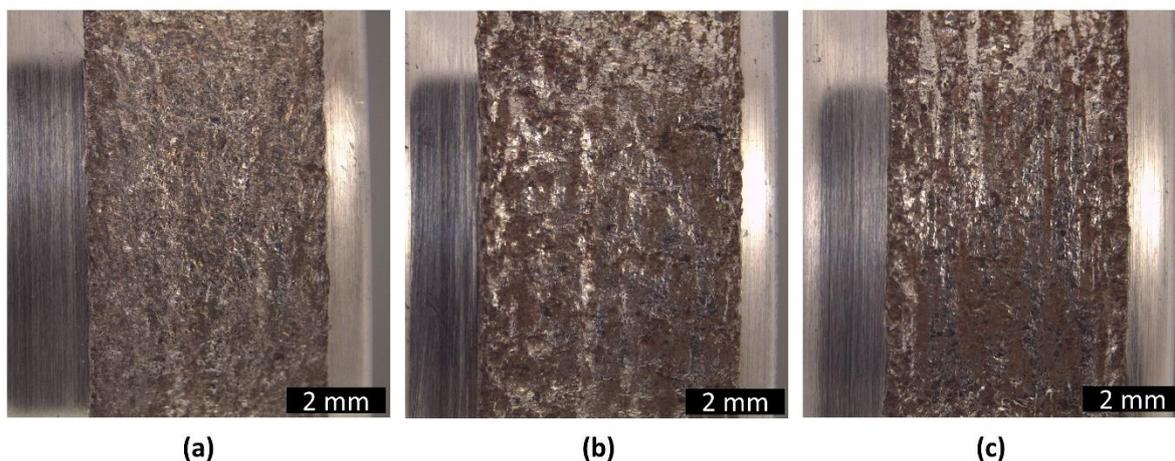


Figura 4.51 - Características superficiais dos discos de roda observada em microscopia estereoscópica. Em (a) condição de ensaio E1% 60°C, em (b) E3% 60°C e em (c) E5% 60°C (imagem em microscopia estereoscópica, sem ataque químico). Fonte: Autor.

Destaque-se a presença de um óxido de uma coloração escura que é característico da presença da Magnetita (ZHU, 2017), confirmado na análise de Raman; (ver seção 4.2.4.1). O comportamento tribológico da Magnetita já foi estudado e sua presença é associada a uma redução na taxa de desgaste, por atuar como lubrificante no contato (SHEN *et al.*, 2022; SHU *et al.*, 2022a; ZHU, 2017; ZHU; YANG; WANG, 2015). A partir de uma análise qualitativa, é possível afirmar que o disco Roda a 60 °C possui uma quantidade de óxido de coloração escura superior ao disco Roda para o ensaio à temperatura ambiente, o que é demonstrado na Figura 4.52.

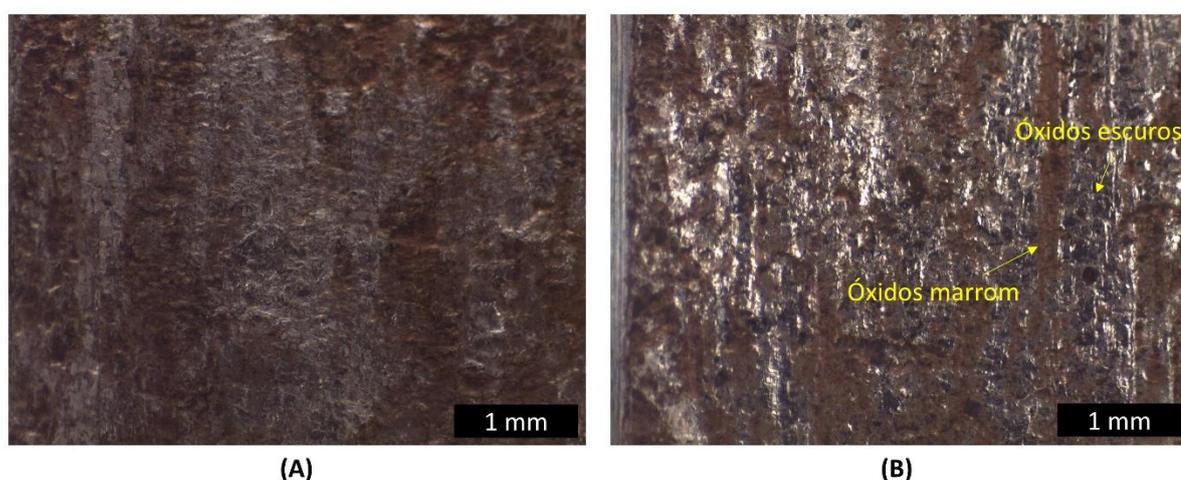


Figura 4.52 - Comparativo da camada de óxido formada na superfície do disco Roda. (A) E5% Amb (B) E5% 60°C (imagem em microscopia estereoscópica, sem ataque químico). Fonte: Autor.

Essa diferença no estado de oxidação superficial encontrada na condição de 5% de escorregamento do discos Roda pode contribuir para a explicação da menor taxa de desgaste para os ensaios realizados a 5% de escorregamento realizados à temperatura de 60 °C. A maior quantidade de óxidos escuros atua reduzindo o desgaste do disco trilho por sua ação lubrificante (SHEN *et al.*, 2022; ZHU, 2017; ZHU; YANG; WANG, 2015).

#### 4.2.4.3 Análise por MEV

Nos ensaios realizados a 60 °C, as superfícies dos discos Roda e Trilho permaneceram inalteradas para os ensaios realizados com 1 e 3% de escorregamento, quando comparados com os ensaios conduzidos à temperatura ambiente. Entretanto, para a condição ensaiada com 5% de escorregamento foram observadas novas características superficiais que sugeriram alteração de mecanismos de desgastes entre os ensaios conduzidos à temperatura ambiente e os conduzidos a 60 °C, o que pode ser visto na Figura 4.53.

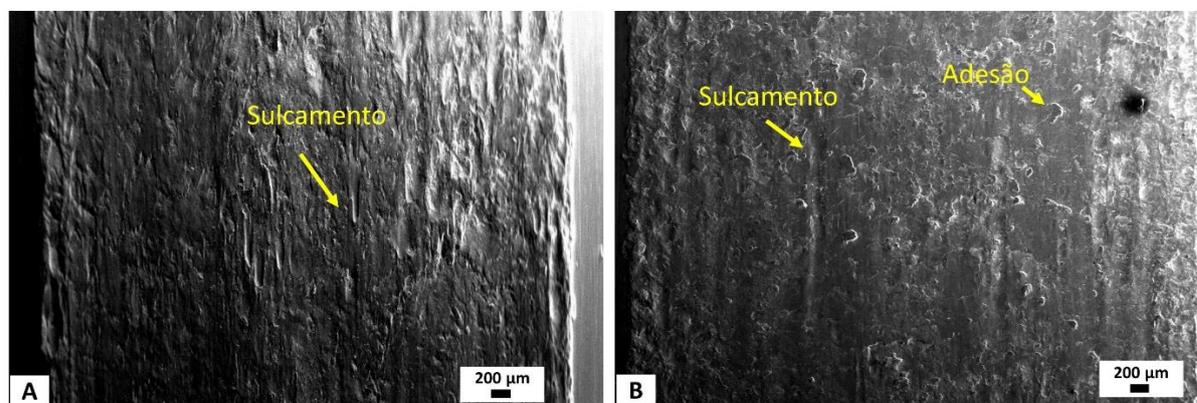


Figura 4.53 - Características dos danos superficiais para o disco Roda. Em (A) dos ensaios E5% Amb e em (B) dos ensaios E5% 60°C (imagens obtidas por MEV, sem ataque químico). Fonte: Autor.

Para o ensaio realizado à temperatura ambiente (A), observa-se na superfície a presença de sulcamentos, caracterizando a presença de um desgaste abrasivo nos discos Roda. Para a condição com 5% de escorregamento, com ensaios com controle de temperatura a 60 °C, observa-se também a presença de sulcamento, mas esses são menos intensos e em menor quantidade. Ressalta-se a presença de marcas superficiais que sugerem a predominância do mecanismo adesivo, conforme pode ser observado na Figura 4.53 (B).

O mecanismo adesivo ocorre por ação das altas pressões do contato combinado com as asperezas existentes na superfície do trilho e roda, que causam uma deformação plástica nas asperezas, gerando um contato íntimo e juntas entre as superfícies. Assim, quando houver um movimento relativo entre as superfícies haverá o rompimento dessas junções, promovendo a transferência de material de uma superfície para a outra, (SOLEIMANI; MOAVENIAN, 2017)

Os discos Trilho para os ensaios com 5% de escorregamento, por sua vez, são avaliados na Figura 4.54. Nota-se que o aumento da temperatura do ensaio para 60 °C provocou uma redução no dano superficial, evidenciando apenas delaminações bem superficiais e menos intensas quando comparada com os ensaios realizados à temperatura ambiente.

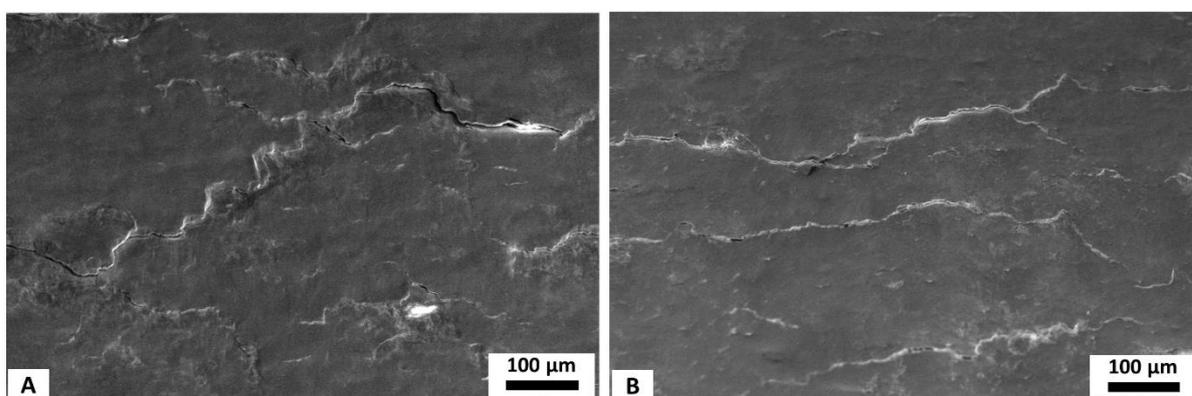


Figura 4.54- Características dos danos superficiais para o disco do trilho. Em (A) dos ensaios E5% Amb e em (B) dos ensaios E5% 60°C (imagens obtidas por MEV, sem ataque químico). Fonte: Autor.

As delaminações menos intensas possuem como consequência uma menor perda de massa por FCR. Justificando nessa forma a menor perda de massa do disco Trilho para a condição E5% 60°C, quando comparado com o disco Trilho para o ensaio E5% Amb.

## 4.2.5 Caracterização subsuperficial

### 4.2.5.1 Camada deformada

A profundidade da camada deformada para o disco Trilho foram de  $162\pm 4$ ,  $180\pm 3$ , e  $198\pm 4$   $\mu\text{m}$  para os ensaios de 1, 3 e 5% de escorregamento, respectivamente. Para os discos Roda, os valores obtidos foram  $154\pm 6$ ,  $170\pm 3$  e  $198\pm 5$   $\mu\text{m}$  para a mesma variação de escorregamento. desse modo, como observado para os ensaios realizados à temperatura ambiente, os resultados dos ensaios feitos à temperatura de  $60\text{ }^\circ\text{C}$  apresentaram forte correlação com o nível de escorregamento do ensaio, conforme é ilustrado na Figura 4.55

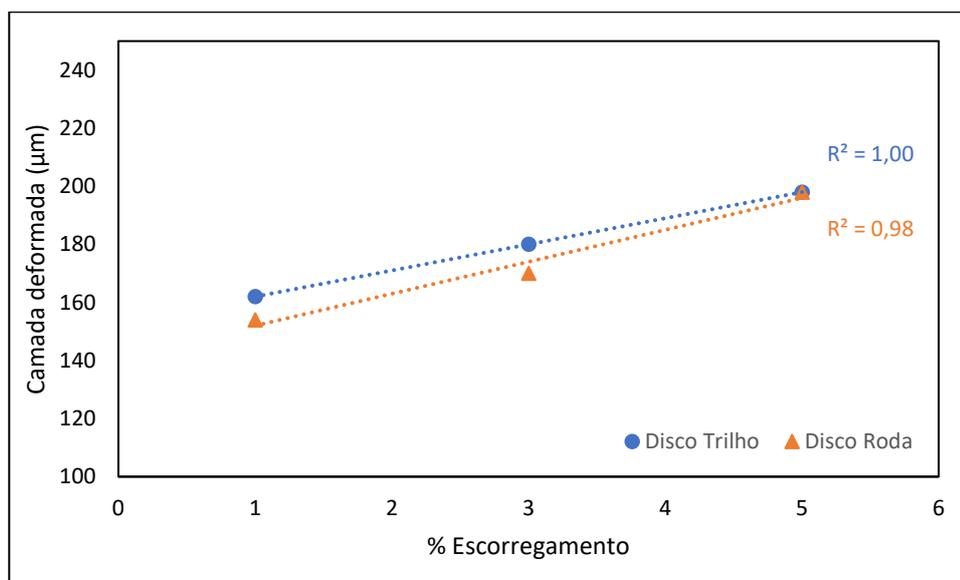


Figura 4.55- Influência do escorregamento da camada deformada para os ensaios realizados a  $60\text{ }^\circ\text{C}$ .  
Fonte: Autor.

Os valores mensurados da profundidade da camada deformada são bem similares aos encontrados nos ensaios à temperatura ambiente. Esse fato evidencia que não há uma influência da temperatura na profundidade da camada deformada.

Na Figura 4.56, são apresentadas as micrografias referentes aos ensaios com 1 e 5% de escorregamento, que são as condições extremas de escorregamento.

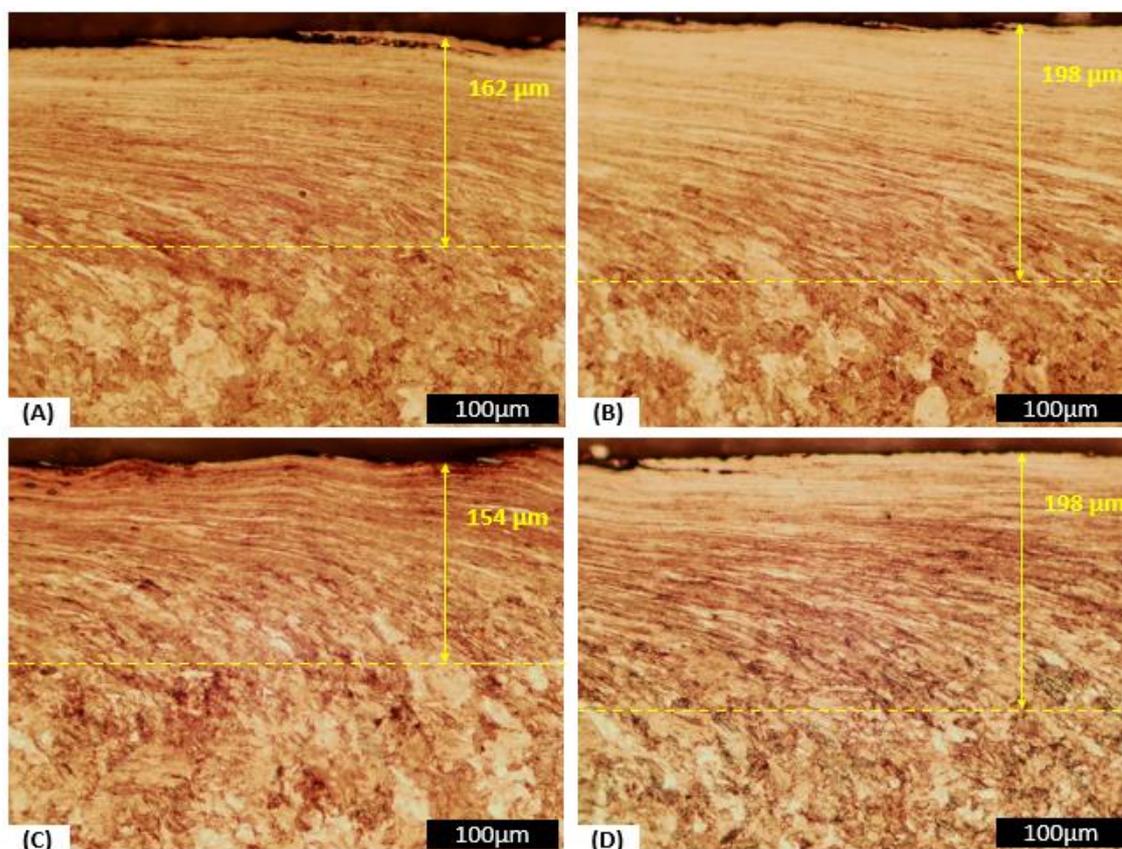


Figura 4.56 - Camada deformada, ataque com Nital M.O. Em (A) Disco do trilho E1%60, (B) Disco Trilho E5%60, (C) Disco Roda E1%60, e em (D) Disco Roda E5%60 (imagem em M.O, ataque Nital 2%, aumento 200X). Fonte: Autor.

#### 4.2.5.2 Perfil de dureza

Na Figura 4.57, são apresentados os resultados de perfil de dureza para os discos Trilho. O valor máximo de dureza atingido pelos discos nos ensaios a 60 °C foram  $748 \pm 7$ ,  $732 \pm 30$  e  $719 \pm 5$  HV para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamento, respectivamente. Esses resultados mostram que não houve influência da temperatura no que se refere ao perfil de dureza dos discos que representam o trilho. O comportamento das curvas de dureza foi bem similar ao observado para os ensaios realizados à temperatura ambiente.

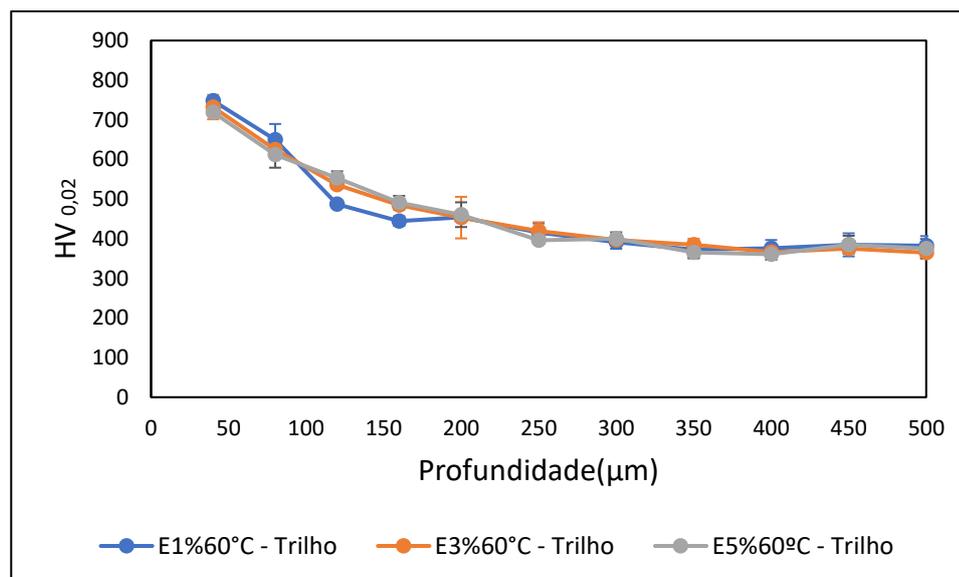


Figura 4.57 - Perfil de dureza dos discos Trilhos para os ensaios realizados a 60 °C. Fonte: Autor.

Para os discos Roda, as durezas máximas atingidas foram de  $596 \pm 29$ ,  $648 \pm 24$  e  $719 \pm 8$  HV para os ensaios com 1, 3 e 5% de escorregamento respectivamente (Figura 4.58). Nos ensaios a 60 °C, também se observou a influência direta do escorregamento no encruamento, tal qual observada nos ensaios conduzidos à temperatura ambiente.

Ao comparar os valores mensurados da dureza dos ensaios realizados a 60 °C com os realizados à temperatura ambiente, parece não haver alterações significativas para as condições de 1 e 3% de escorregamento. Todavia, para a condição de 5%, houve um incremento de dureza superficial de 10%.

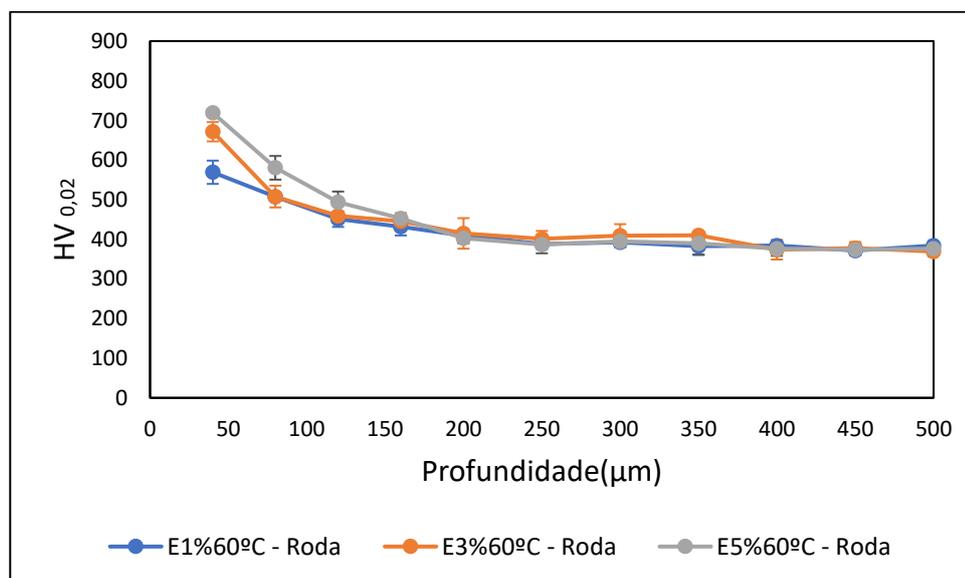


Figura 4.58 - Perfil de dureza dos discos Roda para os ensaios realizados a 60 °C. Fonte: Autor.

O efeito da temperatura no perfil da curva de dureza fica mais evidenciado ao avaliar o gráfico da Figura 4.59. Percebe-se que a dureza é estatisticamente igual para todos os discos e condições de ensaios, exceto para o caso do disco Roda nos ensaios com 5% de escorregamento. Nessa condição, ocorreu um maior encruamento com o aumento de temperatura.

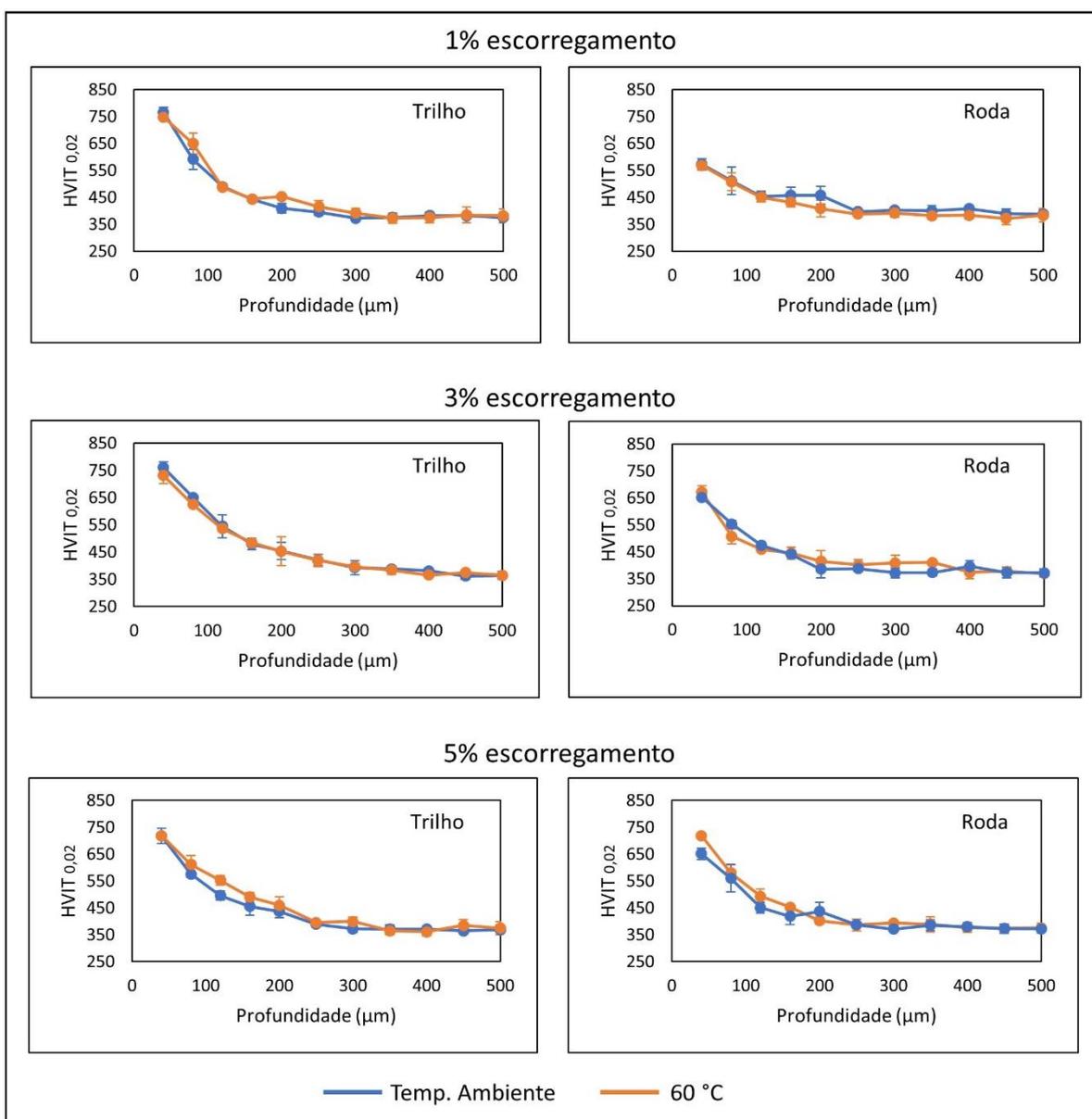


Figura 4.59 - Comparativo efeito da temperatura no perfil de dureza. Curvas em azul para ensaios realizados a frio e curva em laranja para ensaios realizados a 60 °C. Fonte: Autor.

Na Figura 4.60, é apresentada a relação de dureza trilho/roda medida a 40  $\mu\text{m}$  da superfície após o ensaio disco-contra-disco para os ensaios realizados à temperatura ambiente e a 60°C. Ao analisar o gráfico é possível notar uma tendência de queda de relação de dureza em função

do escorregamento. Constatase, também, que a curva dos ensaios realizados a 60 °C apresenta menor relação de dureza trilho/roda quando comparada às dos ensaios realizados à temperatura ambiente para os ensaios realizados a 3 e 5%, parecendo haver correlação com os resultados de taxa de desgaste.

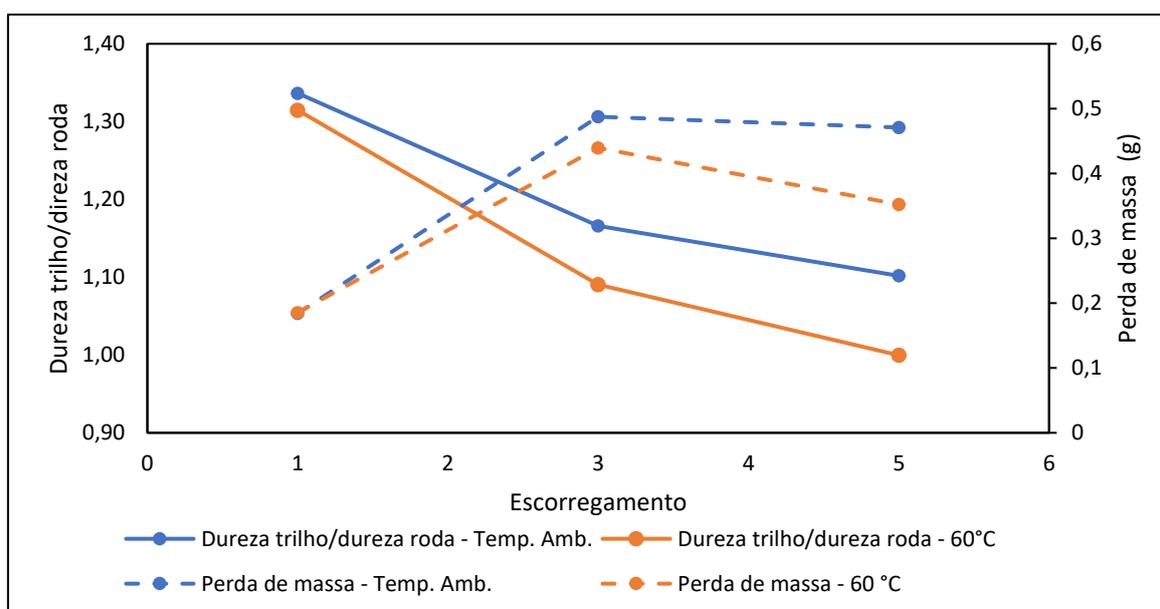


Figura 4.60 – Efeito da relação de dureza trilho/roda após o ensaio disco-contra-disco na perda de massa para os ensaios realizados à temperatura ambiente e a 60 °C nos escorregamentos de 1, 3 e 5%. Fonte: Autor.

Na literatura, Wang e colaboradores afirmam que a dureza do material da roda influencia substancialmente o desgaste e danos tanto dos discos Roda e dos discos Trilho (WANG *et al.*, 2014b). Neste trabalho, mostram-se evidências que o encruamento, durante o ensaio, parece contribuir também para os danos gerados aos discos.

#### 4.2.6 Caracterização das trincas de fadiga de contato

Nesta seção são apresentadas as características das trincas de FCR para os ensaios realizados a 60 °C. Na Figura 4.61 é esclarecido o comportamento do comprimento das trincas em função do escorregamento para os discos que representam o trilho. Constata-se que o comprimento das trincas de FCR é pouco influenciado pelo escorregamento, diferente do observado nos ensaios realizados à temperatura ambiente, na qual as trincas possuíam comprimento decrescente em função do escorregamento; (ver seção 4.1.7).

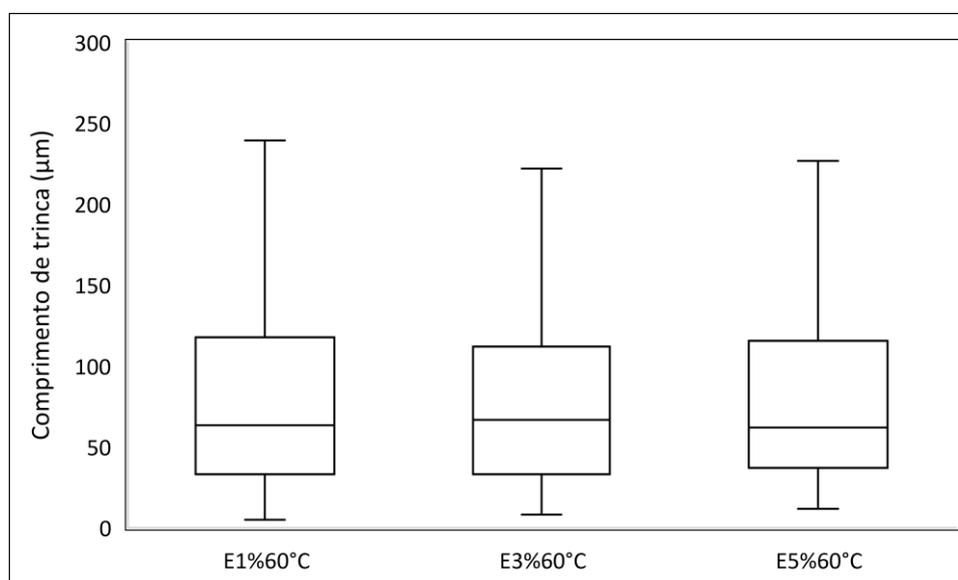


Figura 4.61- Comprimento das trincas dos discos Trilho para os ensaios realizados a 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

O resultado evidenciado sinaliza para uma baixa competição entre FCR e desgaste. Era esperado com o aumento de escorregamento, um maior desgaste, e que esse desgaste suprimisse a abertura da trinca, reduzindo o seu comprimento (DONZELLA *et al.*, 2005). Entretanto, o mecanismo de FCR prevalece para todas as condições de escorregamento. Provavelmente, a redução da perda de massa por conta do desgaste está ocorrendo pela presença da camada de óxido de Magnetita, (seção 4.2.4), que tem atuado no contato como lubrificante, reduzindo o desgaste e potencializando a perda de massa por FCR (SHEN *et al.*, 2022; SHU *et al.*, 2022a; ZHU, 2017; ZHU; YANG; WANG, 2015).

Além do comportamento diferente em função do escorregamento, o comprimento das trincas, nos ensaios realizados a 60 °C, são menores se comparados aos ensaios conduzidos à temperatura ambiente, como pode ser visualizado na Figura 4.62.

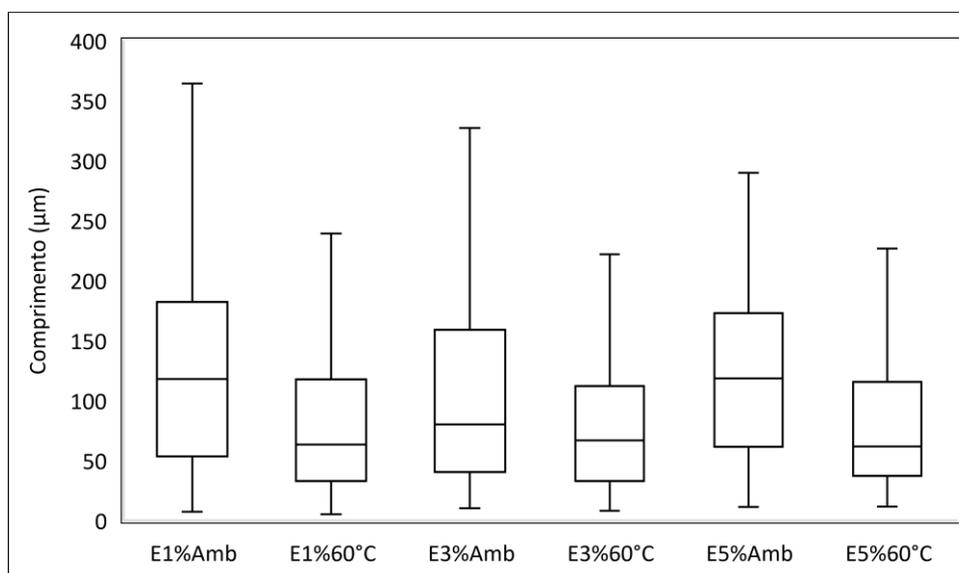


Figura 4.62 - Efeito da temperatura no comprimento das trincas de FCR nos discos Trilho. Fonte: Autor.

No que se refere à profundidade das trincas, observou um incremento na profundidade para as condições de 3 e 5% de escorregamento, quando comparadas com os ensaios realizados com 1% de escorregamento, (ver Figura 4.63). Comportamento similar foi identificado nos ensaios realizados à temperatura ambiente. Essa característica é explicada pela incremento das tensões de cisalhamento na superfície, proporcionando a propagação das trincas para maiores profundidade (LEWIS; DWYER-JOYCE, 2004; RODRÍGUEZ-ARANA *et al.*, 2022).

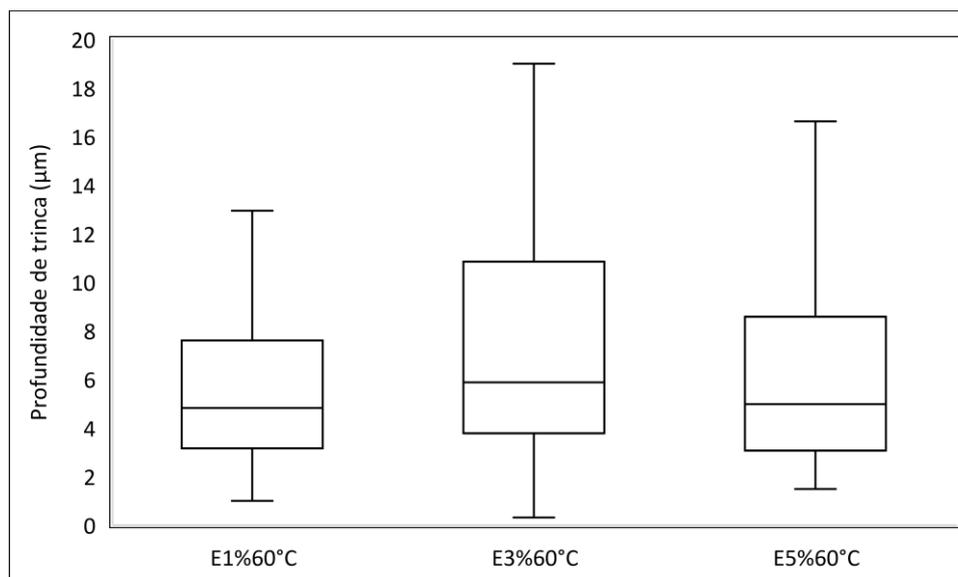


Figura 4.63 - Profundidade das trincas dos discos Trilho para os ensaios realizados a 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

Para os discos que representam a roda, o comprimento das trincas de FCR em função do escorregamento é apresentado na Figura 4.64. Verifica-se um pequeno incremento do comprimento máximo das trincas observadas da condição de 1 para 3% de escorregamento, aumentando-se o comprimento de 118 para 131  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Para 5% de escorregamento, houve um incremento substancial no comprimento das trincas, atingindo um valor de 258  $\mu\text{m}$ . Como explicado na seção 4.14, as tensões trativas na superfície dos discos Roda podem ter conduzido esse incremento do comprimento das trincas em função do escorregamento. Entretanto, cabe ressaltar que a complexidade do tribossistema e as atuações de diversos mecanismo de desgaste que ocorrem com 5% de escorregamento, como tribocorrosão e adesão, podem atuar de maneira sinérgica promovendo esse crescimento de trinca.

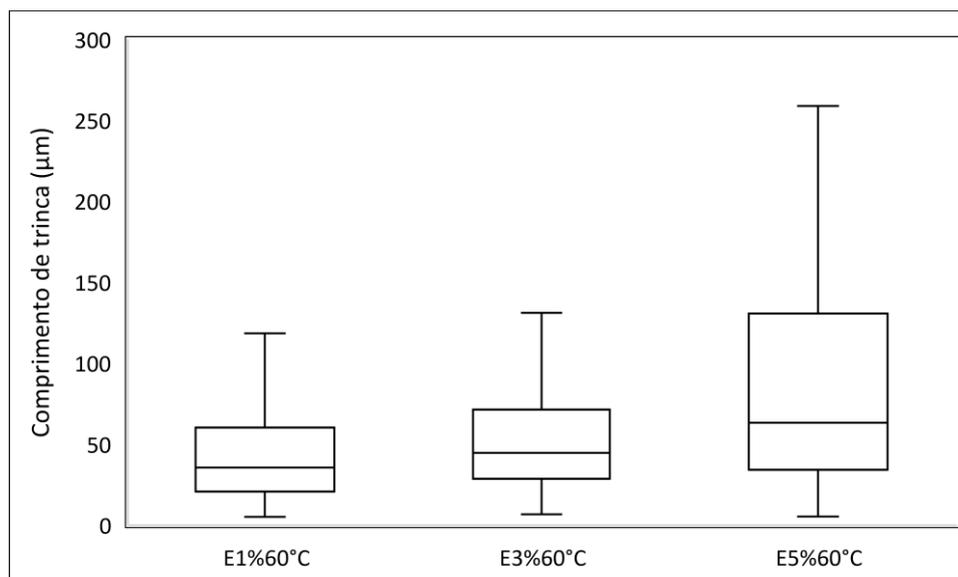


Figura 4.64 – Comprimento das trincas dos discos Roda para os ensaios realizados a 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

No que tange à profundidade das trincas de FCR para os discos que representam a roda, foi notado comportamento similar ao identificado para os ensaios realizados à temperatura ambiente. Verifica-se o incremento da profundidade de trincas para a condição de 3 e 5% de escorregamento, bem como a presença de trincas em maiores profundidades para a condição de 3% de escorregamento. A queda na profundidade das trincas, alterando-se a condição de ensaio de 3 para 5% de escorregamento está associada ao surgimento do mecanismo adesivo nesta região que foi comprovado pelas imagens de MEV na seção 4.2.4.

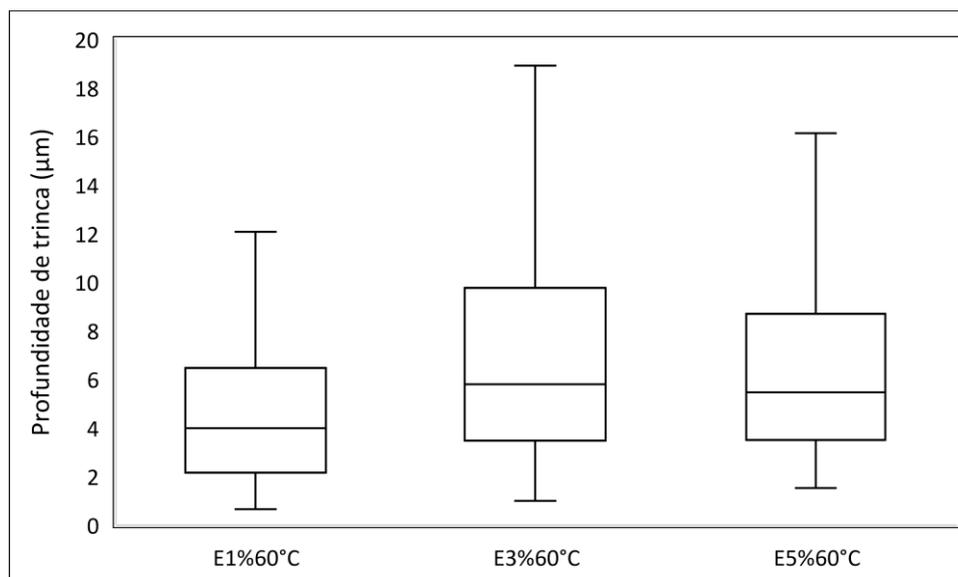


Figura 4.65- Profundidade das trincas dos discos Roda para os ensaios realizados a 60 °C com 1, 3 e 5% de escorregamento. Fonte: Autor.

Posta a apresentação das características referente à propagação das trincas de FCR para os ensaios realizados a 60°C, apresenta-se, na Figura 4.66, a densidade de trincas (trincas apresentadas por mm de superfície analisada) que é uma característica que remete à nucleação das trincas.

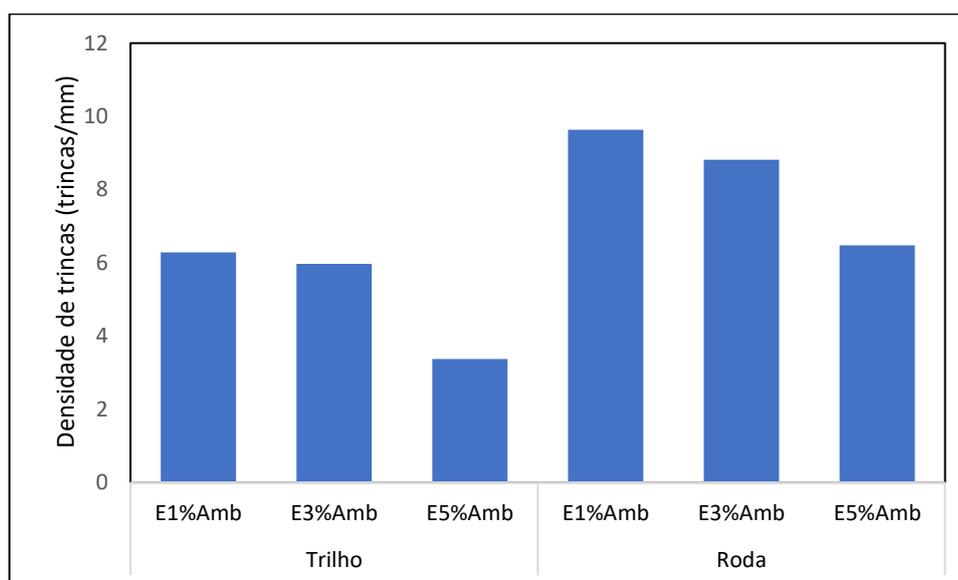


Figura 4.66 - Densidade de trincas para os discos Trilho e para os discos Roda para os ensaios conduzidos a 60 °C. Fonte: Autor.

Identificou-se uma redução das trincas em função do escorregamento e a presença de maior quantidade de trincas nos discos que representam a roda comportamento igual ao apresentado para os ensaios realizados à temperatura ambiente e discutidos na seção 4.1.7.

#### 4.2.7 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se os principais resultados obtidos nesta tese para que se possa ter uma compreensão do efeito da temperatura no comportamento tribológico dos aços de rodas classe C. O efeito da realização dos ensaios realizados a 60 °C para o disco Roda pode ser observado na Figura 4.67. A figura traz um comparativo com as características do COT, camada deformada e perda de massa do material tanto para os ensaios realizados a temperatura ambiente como para os realizados a 60 °C. Conforme observado, o COT não sofre alteração com o aumento da temperatura para todas as condições de escorregamento estudadas. O mesmo comportamento é observado para a camada deformada.

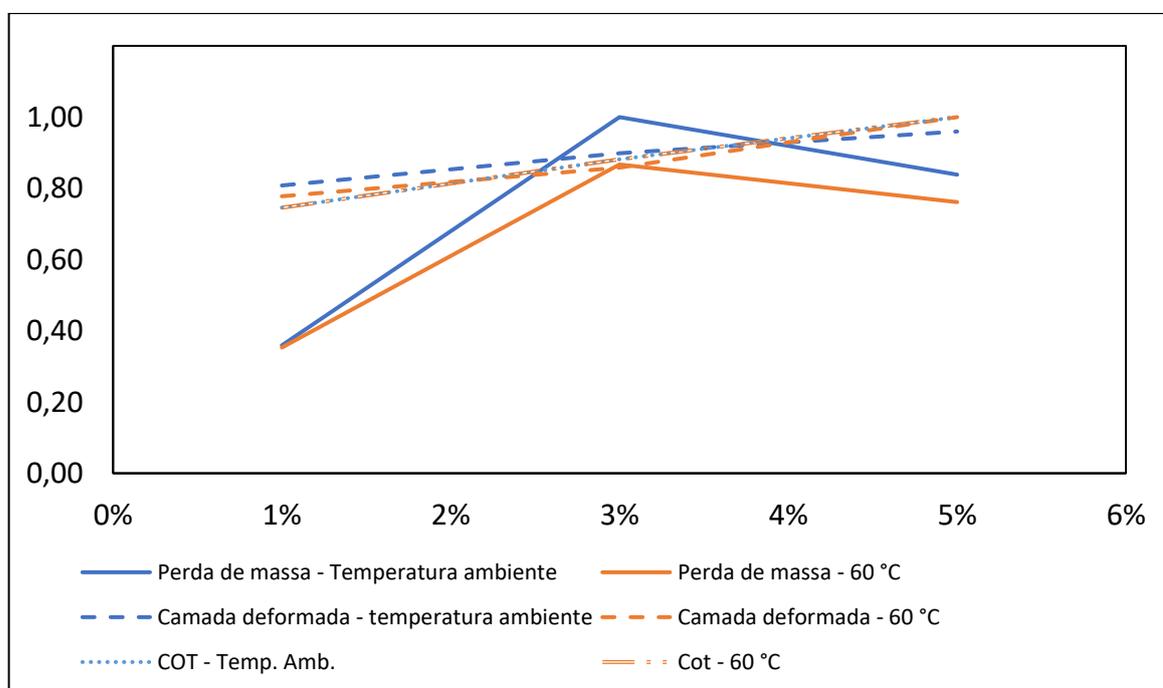


Figura 4.67 - Efeito da temperatura na perda de massa, camada deformada e COT para o disco Roda em função de diferentes escorregamentos . Fonte: Autor.

A redução da perda de massa observada para as condições com 3 e 5% de escorregamento está relacionada ao fato de que, nos ensaios com 60 °C, observou-se um maior estado de oxidação, evidenciando o efeito da temperatura na geração de maior quantidade de óxido, o que também já foi verificado por He e colaboradores (HE *et al.*, 2016). Destaca-se também que o aumento de temperatura proporcionou a formação em maior quantidade de Magnetita, e esta, por sua vez, atuou no contato como lubrificante sólido, atuando da redução do desgaste do disco Trilho (SHEN *et al.*, 2022; ZHU, 2017; ZHU; YANG; WANG, 2015).

Soma-se ainda a importante contribuição da alteração no mecanismo de desgaste para os ensaios conduzidos com 5% de escorregamento, no qual identificou-se um mecanismo abrasivo para os ensaios realizados em temperatura ambiente e um desgaste adesivo para os ensaios conduzidos a 60 °C.

Para o disco Trilho, o comportamento da perda de massa foi similar ao disco Roda, os principais resultados são apresentados na Figura 4.68.

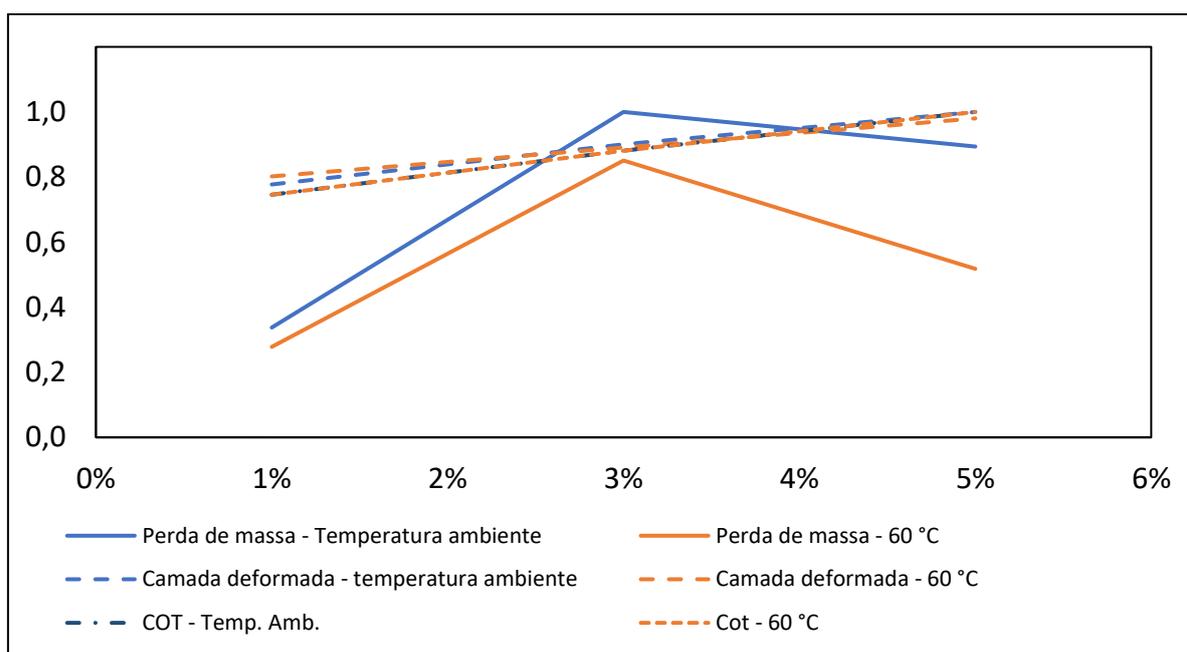


Figura 4.68 - Efeito da temperatura na perda de massa, camada deformada e COT para o disco Trilho em função de diferentes escorregamentos. Fonte: Autor.

A queda acentuada na perda de massa para a condição com 5% de escorregamento ocorreu em virtude da redução das características das trincas de FCR, que, para os ensaios realizados à temperatura de 60 °C, apresentaram comprimento e profundidade menores, conduzindo a uma menor perda de massa, conforme discutido nas seções 4.2.6 e 4.1.7

Por fim, na Figura 4.69 é apresentado um resumo dos principais mecanismos de desgastes atuantes identificados e caracterizados neste trabalho.

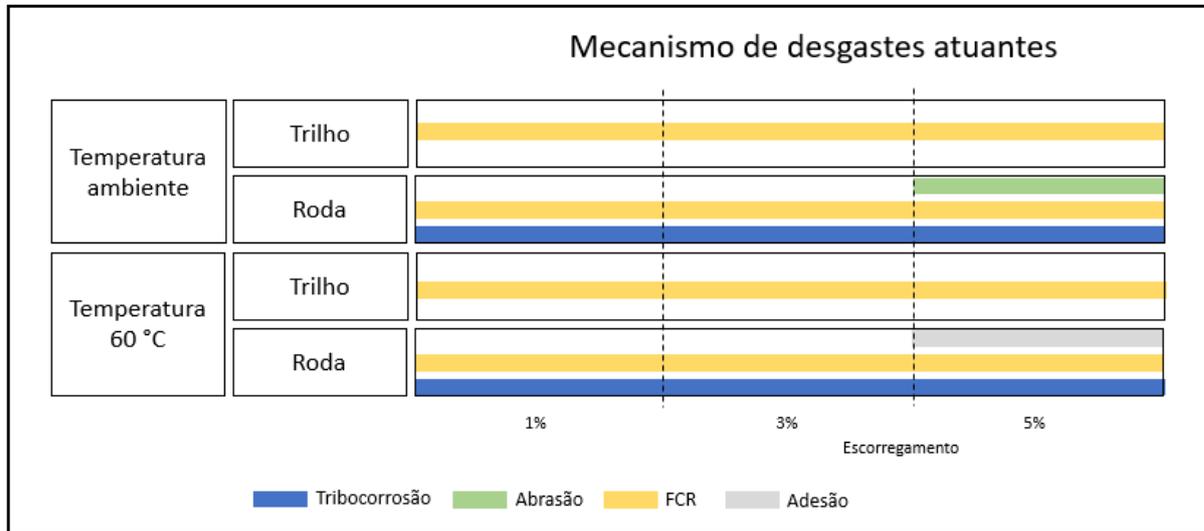


Figura 4.69 - Resumo dos principais mecanismos de desgaste atuantes. Fonte: Autor.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o efeito do escorregamento e da temperatura no comportamento tribológico de um aço de roda classe C utilizando um tribômetro disco-contra-disco. Os resultados dos ensaios disco-contra-disco e as análises posteriores permitiram as seguintes conclusões.

- Para os ensaios realizados à temperatura ambiente, sem controle de temperatura, o escorregamento atuou governando o coeficiente de atrito, a temperatura dos discos ao longo do ensaio e profundidade da camada deformada para ambos os discos, observando para todas essas variáveis uma relação direta com o aumento de escorregamento. Para o disco Roda, notou-se um incremento de dureza, reversão das tensões residuais de compressivas para trativas na superfície dos discos e alteração do mecanismo de desgaste de *Ratcheting* para Abrasivo, também em concordância com o aumento do escorregamento. Para o disco Trilho, identificou-se que ele apresenta dureza superior ao disco Roda após o ensaio em todas as condições de escorregamento, maiores tensões compressivas na sua superfície e, por conseguinte, menor perda de massa quando comparado aos discos Roda.
- Para os ensaios realizados a 60 °C observou que a temperatura não foi capaz de alterar as características do COT, camada deformada e nem deslocar o regime de desgaste.
- O aumento de temperatura atuou na redução da taxa de desgaste para as condições nas quais o material se encontrava em regime severo, chegando a uma redução de 25% para os ensaios realizados com 5% de escorregamento. A redução ocorreu pela formação de uma camada de óxido rico em Magnetita, que atuou como lubrificante sólido, alterando o mecanismo de desgaste dos discos que representam a roda de abrasivo para adesivo. Nos discos que representam o trilho, a redução na perda de massa se deu pelo efeito da temperatura em atenuar os efeitos da FCR.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios com escorregamento maiores e avaliar seu efeito sobre o COT e tensão residual;
- Empreender ensaios com maiores temperatura e criar mapas de desgaste em função de temperatura e escorregamento.
- Avaliar a evolução do encruamento e da tensão residual ao longo do ensaio disco-contra-disco.
- Caracterizar os debris formados em relação a sua morfologia, composição química e propriedades mecânicas.

## 7 PUBLICAÇÕES

Em submissão:

- Rocha, Renan Carreiro; Ewald, Heiter; Rezende, Andrei Bavaresco; Fonseca, Solange Tamara; Mei, Paulo Roberto. Using twin disc for applications in the railway. A systematic review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.
- Ewald, Heiter; Rezende, Rocha, Renan Carreiro; Andrei Bavaresco; Fonseca, Solange Tamara; Scadian, Cherlio; Mei Paulo Roberto. Development of a heating system and the effect of temperature in the twin-disc test. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.

## 8 REFERÊNCIAS

AAR, “Association of American Railroad”. **Manual of standards and recommended practices, section G, M-107/M208, appendix C, topic 3.1.6.** [s.l.], v. vol 1, no M-107/M208, appendix C, topic 3.1.6, p. 180 p, 2011

ADAMS, Jonathan. The rise of research networks. **Nature**, [S. l.], v. 490, n. 7420, p. 335–336, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/490335a>

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

ARIAS-CUEVAS, Oscar; LI, Zili; LEWIS, Roger. A laboratory investigation on the influence of the particle size and slip during sanding on the adhesion and wear in the wheel-rail contact. **WEAR**, v. 271, n. 1–2, SI, p. 14–24, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.050>

BANERJI, A. *et al.* Effect of iron oxides on sliding friction of thermally sprayed 1010 steel coated cylinder bores. **Wear**, [S. l.], v. 376–377, p. 858–868, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.032>

BEATY, Philip *et al.* Experimental modelling of lipping in insulated rail joints and investigation of rail head material improvements. **Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part F - Journal of rail and rapid transit**, v. 230, n. 4, p. 1375–1387, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954409715600740>

BHUSHAN, Bharat. **Modern Tribology Handbook**. Bharat Bhu ed. [S. l.: s. n.]. *E-book*.

BOLTON, P. J.; CLAYTON, P. Rolling—sliding wear damage in rail and tyre steels. **Wear**, [S. l.], v. 93, n. 2, p. 145–165, 1984. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90066-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90066-8)

BRAGHIN, F.; BRUNI, S.; LEWIS, R. 6 - Railway wheel wear. *In*: LEWIS, R.; OLOFSSON, U. B. T. **Wheel–Rail Interface Handbook** (org.). [S. l.]: Woodhead Publishing, 2009. p. 172–210. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845696788.1.172>

BUCKLEY-JOHNSTONE, L. *et al.* A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F:**

**Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 233, n. 2, p. 201–210, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954409718787045>

BUCKLEY-JOHNSTONE, L. E. *et al.* Assessing the impact of small amounts of water and iron oxides on adhesion in the wheel/rail interface using High Pressure Torsion testing. **Tribology International**, [S. l.], v. 135, p. 55–64, 2019 b. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.024>

CAMILO VELEZ, Juan *et al.* Development of a composite friction modifier with carbon nanotubes for applications at the wheel-rail interface. **ADVANCED COMPOSITES LETTERS**, v. 29, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/2633366X20930019>

CAO, X. *et al.* The effect of alumina particle on improving adhesion and wear damage of wheel/rail under wet conditions. **Wear**, [S. l.], v. 348–349, p. 98–115, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.12.004>

CARTER, Frederico William. On the action of a locomotive driving wheel. **Proc. R. Soc. Lond. A**, [S. l.], v. 112, n. February, p. 151–157, 1926.

CASSARO, Luciano. **Análise da influência da temperatura, na ocorrência de flambagem em trechos da estrada de ferro Vitória Minas**. 2017. - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2017.

CHEN, H. *et al.* Estimation of wheel/rail adhesion coefficient under wet condition with measured boundary friction coefficient and real contact area. **Wear**, v. 271, n. 1–2, p. 32–39, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.022>

CHEN, H. *et al.* Influence of axle load on wheel/rail adhesion under wet conditions in consideration of running speed and surface roughness. **Wear**, Japan, v. 366–367, p. 303–309, 2016 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.012>

CHEN, H. *et al.* Microstructure evolution of a hypereutectoid pearlite steel under rolling-sliding contact loading. **Materials Science and Engineering A**, v. 655, p. 50–59, 2016 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.082>

CHEN, H.; TANIMOTO, H. Experimental observation of temperature and surface roughness effects on wheel/rail adhesion in wet conditions. **International Journal of Rail Transportation**, , v. 6, n. 2, p. 101–112, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1415772>

CHRISTOFOROU, P.; FLETCHER, D. I.; LEWIS, R. Benchmarking of premium rail

material wear. **Wear**, v. 436–437, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202990>

CROCKETT, R. M. *et al.* Wear and electrical resistance on diesel lubricated surfaces undergoing reciprocating sliding. **Tribology Letters**, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 187–194, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000009729.15103.5c>

DE FARIA, D. L. A.; VENÂNCIO SILVA, S.; DE OLIVEIRA, M. T. Raman microspectroscopy of some iron oxides and oxyhydroxides. **Journal of Raman Spectroscopy**, [S. l.], v. 28, n. 11, p. 873–878, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4555\(199711\)28:11<873::aid-jrs177>3.0.co;2-b](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4555(199711)28:11<873::aid-jrs177>3.0.co;2-b)

DE MELLO, Jose Daniel Biasoli *et al.* Tribological behaviour of sintered iron based self-lubricating composites. **Friction**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 285–307, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0186-2>

DETERS, Ludger; PROKSCH, Matthias. Friction and wear testing of rail and wheel material. **Wear**, [S. l.], v. 258, n. 7, p. 981–991, 2005. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.045>

DING, H. H. *et al.* Wear mapping and transitions in wheel and rail materials under different contact pressure and sliding velocity conditions. **Wear**, [S. l.], v. 352–353, p. 1–8, 2016. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.01.017>

DONZELLA, G. *et al.* The competitive role of wear and RCF in a rail steel. **Engineering Fracture Mechanics**, [S. l.], v. 72, n. 2, p. 287–308, 2005. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.04.011>

DONZELLA, G. *et al.* Progressive damage assessment in the near-surface layer of railway wheel-rail couple under cyclic contact. **WEAR**, v. 271, n. 1–2, SI, p. 408–416, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.042>

DUMAS, Maxime *et al.* 3D numerical modelling of turning-induced residual stresses – A two-scale approach based on equivalent thermo-mechanical loadings. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 297, p. 117274, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117274>

EKBERG, A.; KABO, E.; ANDERSSON, H. An engineering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, [S. l.], v. 25, n. 10, p. 899–909, 2002. Disponível em:

<https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2002.00535.x>

FACCOLI, M. *et al.* Effect of desert sand on wear and rolling contact fatigue behaviour of various railway wheel steels. **Wear**, [S. l.], v. 396–397, p. 146–161, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.05.012>

FANTECELLE STREY, Nathan *et al.* Comparison of rolling contact fatigue damage between railway wheels and twin-disc test specimens. **Tribology International**, [S. l.], v. 160, p. 107037, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107037>

FISCHER, F. D.; DAVES, W.; WERNER, E. A. On the temperature in the wheel–rail rolling contact\*. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, [S. l.], v. 26, n. 10, p. 999–1006, 2003. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00700.x>

FLETCHER, D. I.; BEYNON, J. H. Development of a Machine for Closely Controlled Rolling Contact Fatigue and Wear Testing. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 28, n. 4, p. 267–275, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/JTE12104J>

FRACALOSSI, JOÃO PAULO CARLOS. **Análise comparativa do custo do ciclo de vida de rodas ferroviárias do fabricante A e do fabricante B em vagões de minério**. 2017. - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2017. Disponível em: [http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/18713/2/CT\\_CEECVIT\\_1\\_2016\\_12.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/18713/2/CT_CEECVIT_1_2016_12.pdf)

FROMENT, Françoise; TOURNIÉ, Aurélie; COLOMBAN, Philippe. Raman Identification of natural red to yellow pigments: ochre and iron-containing ores. **Journal of Raman Spectroscopy**, [S. l.], v. 39, n. march, p. 560–5680, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jrs>

GALAS, R. *et al.* Case study: The influence of oil-based friction modifier quantity on tram braking distance and noise. **Tribology in Industry**, v. 39, n. 2, p. 198–206, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.02.06>

GALLARDO-HERNANDEZ, E. A.; LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R. S. Temperature in a twin-disc wheel/rail contact simulation. **Tribology International**, [S. l.], v. 39, n. 12, p. 1653–1663, 2006. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.01.028>

GALLARDO, E. A.; LEWIS, R. Coating and treatment solutions for rolling/sliding component contacts. **Wear**, [S. l.], v. 267, n. 5, p. 1009–1021, 2009. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.021>

GARNHAM, J. E.; BEYNON, J. H. Dry rolling-sliding wear of bainitic and pearlitic steels. **Wear**, [S. l.], v. 157, n. 1, p. 81–109, 1992. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90189-F](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90189-F)

GARNHAM, J. E.; DAVIS, C. L. Very early stage rolling contact fatigue crack growth in pearlitic rail steels. **Wear**, v. 271, n. 1–2, p. 100–112, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.004>

GLAESER, W. A.; SHAFFER, S. J. **Contact Fatigue**. [S. l.]: ASM International, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v19.a0002373>

HARDWICK, C.; LEWIS, R.; EADIE, D. T. Wheel and rail wear-Understanding the effects of water and grease. **Wear**, v. 314, n. 1–2, p. 198–204, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.020>

HARDWICK, C.; LEWIS, R.; STOCK, R. The effects of friction management materials on rail with pre existing rcf surface damage. **Wear**, v. 384–385, p. 50–60, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.016>

HARMON, M. *et al.* Evaluation of the coefficient of friction of rails in the field and laboratory using several devices. In: (Nunez A., Li Z., Org.) 2018, 2018. p. 364–373. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85059534090&partnerID=40&md5=eb981610c6445a73815c71e3bb2a832f>

HARMON, M.; LEWIS, R. Review of top of rail friction modifier tribology. **Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 150–162, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17515831.2016.1216265>

HE, C. G. *et al.* Experimental investigation on the effect of operating speeds on wear and rolling contact fatigue damage of wheel materials. **Wear**, [S. l.], v. 364–365, p. 257–269, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.08.006>

HE, C. G. *et al.* On the surface scratch and thermal fatigue damage of wheel material under different braking speed conditions. **Engineering Failure Analysis**, [S. l.], v. 79, p. 889–901, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.017>

HIENSCH, M.; BURGELMAN, N. Rolling contact fatigue: Damage function development from two-disc test data. **Wear**, [S. l.], v. 430–431, p. 376–382, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.028>

HU, Y. *et al.* Comparison of wear and rolling contact fatigue behaviours of bainitic and

pearlitic rails under various rolling-sliding conditions. **Wear**, [S. l.], v. 460–461, p. 203455, 2020 a. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203455>

HU, Y. *et al.* Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions. **Tribology International**, [S. l.], v. 143, p. 106091, 2020 b. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106091>

HU, Y. *et al.* Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading. **Tribology International**, [S. l.], v. 154, p. 106685, 2021 a. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106685>

HU, Y. *et al.* Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values. **Wear**, [S. l.], p. 203831, 2021 b. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203831>

HU, Y. *et al.* Wear of driving versus driven discs in a twin disc rolling-sliding test. **Wear**, [S. l.], v. 512–513, p. 204528, 2023. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204528>

HUA, Jun *et al.* Microstructure evolution and properties of wheel steel under different pearlite content and slip ratio conditions. **Wear**, [S. l.], p. 204526, 2022. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204526>

HUANG, W. *et al.* A Subscale Experimental Investigation on the Influence of Sanding on Adhesion and Rolling Contact Fatigue of Wheel/Rail under Water Condition. **Journal of Tribology**, [S. l.], v. 139, n. 1, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4033100>

HUANG, Y. B. *et al.* On the formation and damage mechanism of rolling contact fatigue surface cracks of wheel/rail under the dry condition. **Wear**, [S. l.], v. 400–401, p. 62–73, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.020>

ISHIDA, Makoto; ABE, Noritsugi. Experimental study on rolling contact fatigue from the aspect of residual stress. **Wear**, [S. l.], v. 191, n. 1, p. 65–71, 1996. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06712-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06712-4)

ISHIZAKA, K. *et al.* Influence of temperature on adhesion coefficient and bonding strength of leaf films: A twin disc study. **Wear**, v. 454–455, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203330>

ISHIZAKA, K.; LEWIS, S. R.; LEWIS, R. The low adhesion problem due to leaf

contamination in the wheel/rail contact: Bonding and low adhesion mechanisms. **Wear**, [S. l.], v. 378–379, p. 183–197, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.044>

ISHIZAKA, Kei *et al.* Chemistry of black leaf films synthesised using rail steels and their influence on the low friction mechanism. **RSC Advances**, [S. l.], v. 8, n. 57, p. 32506–32521, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c8ra06080k>

KATO, T.; KATO, H.; MAKINO, T. Effect of elevated temperature on shelling property of railway wheel steel. **Wear**, S v. 366–367, p. 359–367, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.015>

KATO, T.; SUGETA, A.; NAKAYAMA, E. Investigation of influence of white layer geometry on spalling property in railway wheel steel. **Wear**, [S. l.], v. 271, n. 1–2, p. 400–407, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.024>

KNOTHE, K. History of wheel/rail contact mechanics: from Redtenbacher to Kalker. **Vehicle System Dynamics**, [S. l.], v. 46, n. 1–2, p. 9–26, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00423110701586469>

LEE, H. Estimation of Adhesion Coefficient Using Dynamic Adhesion Model. **Journal of the Korean Society for Railway**, v. 21, n. 4, p. 331–341, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2018.21.4.331>

LEE, H.; NAMGUNG, H. G.; KWON, S. B. Effect of train velocity on the amount of airborne wear particles generated from wheel–rail contacts. **Wear**, Tv. 414–415, p. 296–302, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.08.023>

LEE, HyunWook. Generation of airborne wear particles from the wheel-rail contact under wet conditions using a twin-disk rig. **WEAR**, v. 448, 2020 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203236>

LEE, HyunWook. The effect of water lubricant on reducing the generation of airborne wear particles from wheel-rail contacts under various train velocities. **TRIBOLOGY INTERNATIONAL**, v. 150, 2020 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106393>

LEE, HyunWook. Generation characteristics of the airborne wear particles emitted from the wheel-rail contact for various train velocities and their generation relation with the train velocity. **ATMOSPHERIC ENVIRONMENT-X**, v. 5, 2020 c. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2020.100068>

LESO, Tshenolo Phinah *et al.* Study of rolling contact fatigue, rolling and sliding wear of class B wheel steels against R350HT and R260 rail steels under dry contact conditions using the twin disc setup. **Tribology International**, [S. l.], v. 174, p. 107711, 2022. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107711>

LEWIS, R. *et al.* The effect of friction modifiers on wheel/rail isolation. **Wear**, v. 271, n. 1–2, p. 71–77, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.036>

LEWIS, R. *et al.* Towards a standard approach for the wear testing of wheel and rail materials. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 231, n. 7, p. 760–774, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954409717700531>

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**, [S. l.], v. 430–431, p. 383–392, 2019. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.030>

LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R. S. Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, [S. l.], v. 218, n. 6, p. 467–478, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1243/1350650042794815>

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. 2 - Basic tribology of the wheel–rail contact. *In*: LEWIS, R.; OLOFSSON, U. B. T. **Wheel–Rail Interface Handbook (org.)**. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2009. p. 34–57. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845696788.1.34>

LEWIS, S. R. *et al.* Assessment of railway curve lubricant performance using a twin-disc tester. **Wear**, v. 314, n. 1–2, p. 205–212, 2014 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.033>

LEWIS, S. R. *et al.* Investigation of the isolation and frictional properties of hydrophobic products on the rail head, when used to combat low adhesion. **Wear**, v. 314, n. 1–2, p. 213–219, 2014 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.024>

LEWIS, S. R. *et al.* A new method for the assessment of traction enhancers and the generation of organic layers in a twin-disc machine. **Wear**, v. 366–367, p. 258–267, 2016 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.030>

LEWIS, S. R. *et al.* Improving rail wear and RCF performance using laser cladding. **Wear**,

v. 366–367, p. 268–278, 2016 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.011>

LEWIS, S. R.; LEWIS, R.; FLETCHER, D. I. Assessment of laser cladding as an option for repairing/enhancing rails. **Wear**, v. 330–331, p. 581–591, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.027>

LI, Q.; GUO, J.; ZHAO, A. Effect of Upper Bainite on Wear Behaviour of High-Speed Wheel Steel. **Tribology Letters**, [S. l.], v. 67, n. 4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11249-019-1239-7>

LI, Q. H. *et al.* Microstructural Evolution of a Hypoeutectoid Pearlite Steel under Rolling-sliding Contact Loading. **Journal of Iron and Steel Research International**, v. 23, n. 10, p. 1054–1060, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30157-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30157-1)

LI, Q.; HUANG, X.; HUANG, W. Fatigue property and microstructure deformation behavior of multiphase microstructure in a medium-carbon bainite steel under rolling contact condition. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 125, p. 381–393, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.04.019>

LI, Yang *et al.* Analysis of fatigue crack propagation in rails under combined action of wheel load and residual stress. **Engineering Failure Analysis**, [S. l.], v. 115, p. 104689, 2020. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104689>

LI, Z. Y. *et al.* Investigation on rolling sliding wear behavior of wheel steel by laser dispersed treatment. **Wear**, v. 314, n. 1–2, p. 236–240, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.007>

LIU, C. P. *et al.* Effect of original microstructure on wear property of ER9 wheel steel. **Ironmaking and Steelmaking**, [S. l.], 2020 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1741280>

LIU, C. P. *et al.* Effect of pre-wear on the rolling contact fatigue property of D2 wheel steel. **Wear**, [S. l.], v. 442–443, 2020 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203154>

LIU, C. P. *et al.* An EBSD Investigation on the Evolution of the Surface Microstructure of D2 Wheel Steel During Rolling Contact Fatigue. **Tribology Letters**, [S. l.], v. 68, n. 1, 2020 c. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11249-020-1277-1>

LIU, Heli *et al.* Effects of lubrication on gear performance: A review. **Mechanism and Machine Theory**, [S. l.], v. 145, p. 103701, 2020 d. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103701>

LIU, P. *et al.* Experimental investigation on the wear and damage characteristics of machined wheel/rail materials under dry rolling-sliding condition. **Metals**, v. 10, n. 4, 2020 e. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met10040472>

LU, P. *et al.* Laser cladding of rail; the effects of depositing material on lower rail grades. **Wear**, v. 438–439, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203045>

LÜBBE, Maike *et al.* Identification of iron oxide phases in thin films grown on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) by Raman spectroscopy and X-ray diffraction. **Surface Science**, [S. l.], v. 604, n. 7, p. 679–685, 2010. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susc.2010.01.015>

Luccidi, Y., Rezende, A. B., Fonseca, S. T., and Mei, P. R. Study of the Running-In Period in the Twin-Disc Wear Test Using Steel From a Class C Forged Railway Wheel. **ASME. J. Tribol.** Vol. 144. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4054758>

LUNDÉN, R.; PAULSSON, B. 1 - Introduction to wheel–rail interface research. In: LEWIS, R.; OLOFSSON, U. B. T. Wheel–Rail Interface Handbook (org.). [S. l.]: Woodhead Publishing, 2009. p. 3–33. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845696788.1.3>

MA, L. *et al.* Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions. **Wear**, [S. l.], v. 366–367, p. 13–26, 2016. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.028>

MAKINO, Taizo; KATO, Takanori; HIRAKAWA, Kenji. The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 36, n. 1, p. 68–79, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.08.014>

MARSHALL, Craig P.; DUFRESNE, William J. B.; RUFLEDT, Carson J. Polarized Raman spectra of hematite and assignment of external modes. **Journal of Raman Spectroscopy**, [S. l.], v. 51, n. 9, p. 1522–1529, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jrs.5824>

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.025>

MAZZÙ, A. *et al.* An experimental procedure for surface damage assessment in railway wheel and rail steels. **Wear**, [S. l.], v. 342–343, p. 22–32, 2015. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.006>

MENEGHETTI, G.; TERRIN, A.; GIACOMETTI, S. A twin disc test rig for contact fatigue characterization of gear materials. **Procedia Structural Integrity**, [S. l.], v. 2, p. 3185–3193, 2016. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.397>

MERCADO-SOLIS, R. D. *et al.* Modelling surface thermal damage to hot mill rolls. **Wear**, [S. l.], v. 263, n. 7, p. 1560–1567, 2007. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.062>

MERRITT, Henry E. Worm Gear Performance. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, [S. l.], v. 129, n. 1, p. 127–194, 1935. Disponível em: [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1935\\_129\\_011\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1935_129_011_02)

MESARITIS, M. *et al.* A laboratory demonstration of rail grinding and analysis of running roughness and wear. **Wear**, [S. l.], v. 457, n. April, p. 203379, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203379>

MESSAADI, Maha; OOMEN, Matthijs; KUMAR, Ankit. Friction modifiers effects on tribological behaviour of bainitic rail steels. **TRIBOLOGY INTERNATIONAL**, v. 140, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105857>

MIRANDA, R. S. *et al.* Fatigue and wear behavior of pearlitic and bainitic microstructures with the same chemical composition and hardness using twin-disc tests. **Wear**, [S. l.], p. 204253, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2022.204253>

MODER, Jakob *et al.* A Novel Two-Disc Machine for High Precision Friction Assessment. **Advances in Tribology**, [S. l.], v. 2017, p. 8901907, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/8901907>

MOHD RAZALI, Nornadiah; BEE WAH, Yap. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 21–33, 2011.

NAKAHARA, T. *et al.* Relationship between surface oxide layer and transient traction characteristics for two steel rollers under unlubricated and water lubricated conditions. **Wear**, v. 271, n. 1–2, p. 25–31, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.030>

NEFF, Delphine *et al.* Structural characterization of corrosion products on archaeological iron: An integrated analytical approach to establish corrosion forms. **Journal of Raman Spectroscopy**, [S. l.], v. 35, n. 8–9, p. 739–745, 2004. Disponível em:

<https://doi.org/10.1002/jrs.1130>

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. [S. l.: s. n.]. *E-book*. Disponível em: [www.grupoa.com.br](http://www.grupoa.com.br)

OH, Sei J.; COOK, D. C.; TOWNSEND, H. E. **Characterization of iron oxides commonly formed as corrosion products on steel**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.1023/a:1011076308501>

OHTSUKA, Toshiaki; SATO, Norio. Raman Spectroscopy of Thin Corrosion Films on Iron at 100 to 150 °C in Air. **Corrosion**, [S. l.], v. 42, n. 8, p. 275–283, 1986.

OLIVER, W. C.; PHARR, G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. **Journal of Materials Research**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. 1564–1583, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>

OLOFSSON, U.; TELLISKIVI, T. Wear, plastic deformation and friction of two rail steels—a full-scale test and a laboratory study. **Wear**, [S. l.], v. 254, n. 1, p. 80–93, 2003. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00291-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00291-0)

OMASTA, M. *et al.* Influence of sanding parameters on adhesion recovery in contaminated wheel-rail contact. **Wear**, v. 322–323, p. 218–225, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.11.017>

PAGANI, Regina Negri; KOVALESKI, João Luiz; RESENDE, Luis Mauricio. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, [S. l.], v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>

PÉREZ-DE BRITO, A. F. *et al.* Linseed and Complex Rosin Ester Oils Additivated with MWCNTs and Nanopearls for Gears/Wheel-Rail Systems. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 122, n. 2, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ejlt.201900331>

PYZALLA, A. *et al.* Changes in microstructure, texture and residual stresses on the surface of a rail resulting from friction and wear. **Wear**, [S. l.], v. 251, n. 1, p. 901–907, 2001. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00748-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00748-7)

RAMALHO, A. Wear modelling in rail-wheel contact. **Wear**, v. 330–331, p. 524–532, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.067>

RAZHKOVSKIY, A. A. *et al.* Optimization of hardness ratio in rail–wheel friction pair. **Journal of Friction and Wear**, [S. l.], v. 36, n. 4, p. 334–341, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3103/S1068366615040157>

REZENDE, A. B. *et al.* Effect of vanadium addition on the surface roughness and fatigue crack propagation in a railroad wheel using twin disc wear test. **Defect and Diffusion Forum**, v. 391, p. 66–73, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.391.66>

REZENDE, A. B. *et al.* Wear behavior of bainitic and pearlitic microstructures from microalloyed railway wheel steel. **Wear**, [S. l.], v. 456–457, 2020 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203377>

REZENDE, A. B. *et al.* Residual Stress Characterization by X-Ray Diffraction and Correlation with Hardness in a Class D Railroad Wheel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [S. l.], v. 29, n. 9, p. 6223–6227, 2020 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05097-x>

REZENDE, Andrei Bavaresco. **Comparação da resistência ao desgaste entre as microestruturas perlíticas e bainíticas obtidas de uma mesma roda ferroviária**. 2020. - Unicamp - Universidade Estadual de Campinas, [s. l.], 2020.

RODRÍGUEZ-ARANA, Borja *et al.* Investigation of a relationship between twin-disc wear rates and the slipping contact area on R260 grade rail. **Tribology International**, [S. l.], v. 168, p. 107456, 2022. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107456>

ROY, Taposh *et al.* Residual stress in laser clad heavy-haul rails investigated by neutron diffraction. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 278, p. 116511, 2020. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116511>

SALAS VICENTE, F.; PASCUAL GUILLAMÓN, M. Use of the fatigue index to study rolling contact wear. **Wear**, v. 436–437, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203036>

SANTA, J. F. *et al.* Twin disc assessment of wear regime transitions and rolling contact fatigue in R400HT – E8 pairs. **Wear**, v. 432–433, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.031>

SCIAMMARELLA, C. A. *et al.* Experimental evaluation of rolling contact fatigue in railroad wheels. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 91, p. 158–170, 2016. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.05.035>

SEO, J. W. *et al.* Rolling contact fatigue and wear behavior of rail steel under dry rolling-sliding contact condition. **Korea Railroad Research**. 437-757, South Korea: Trans Tech Publications, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.891-892.1545>

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.012>

SEO, J. W. *et al.* Effect of Friction Modifier on Rolling Contact Fatigue and Wear of Wheel and Rail Materials. **Tribology Transactions**, v. 61, n. 1, p. 19–30, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10402004.2016.1271487>

SEO, J. W. *et al.* Effects of Wheel Materials on Wear and Fatigue Damage Behaviors of Wheels/Rails. **Tribology Transactions**, [S. l.], v. 62, n. 4, p. 635–649, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10402004.2019.1588446>

SEO, J. W. *et al.* Effects of Laser Cladding for Repairing and Improving Wear of Rails. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 20, n. 7, p. 1207–1217, 2019 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00115-y>

SEO, Jung-Won; HUR, Hyun-Moo; KWON, Seok-Jin. Effect of Mechanical Properties of Rail and Wheel on Wear and Rolling Contact Fatigue. **Metals**, [S. l.], v. 12, n. 4, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met12040630>

SEO, Jung Won *et al.* Effects of metal removal and residual stress on the contact fatigue life of railway wheels. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 30, n. 10, p. 2021–2029, 2008. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.12.003>

SEO, Jung Won *et al.* Analysis of contact fatigue crack growth using twin-disc tests and numerical evaluations. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 55, p. 54–63, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.05.005>

SEO, Jungwon *et al.* Numerical stress analysis and rolling contact fatigue of White Etching Layer on rail steel. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 203–211, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.08.007>

SHEN, Ming-xue *et al.* Role of ambient temperature in the adhesion and damage characteristics of wheel/rail interface during rolling-sliding contact. **Wear**, [S. l.], v. 506–507, p. 204458, 2022. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204458>

SHI, L. B. *et al.* Influence of low temperature environment on the adhesion characteristics of wheel-rail contact. **Tribology International**, [S. l.], v. 127, p. 59–68, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.05.037>

SHI, L. B. *et al.* Study on the wheel/rail adhesion restoration and damage evolution in the single application of alumina particles. **Wear**, v. 426–427, p. 1807–1819, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.021>

SHI, L. B. *et al.* Laboratory investigation on the particle-size effects in railway sanding: Comparisons between standard sand and its micro fragments. **Tribology International**, [S. l.], v. 146, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106259>

SHI, X. *et al.* Hardness matching of rail/wheel steels for high-speed-train based on wear rate and rolling contact fatigue performance. **Materials Research Express**, v. 6, n. 6, 2019 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab072d>

SHI, Xiao-jiao *et al.* Wear Behavior of High-Speed Wheel and Rail Steels under Various Hardness Matching. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [S. l.], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07062-2>

SHU, K. *et al.* Effect of dynamic windblown sand environments on the wear and damage of wheel-rail under different slip ratios. **Wear**, [S. l.], v. 500–501, p. 204349, 2022 a. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204349>

SHU, Kang *et al.* Influence of sand transport rate on rolling wear and damage behaviors of wheel/rail in Gobi and desert windblown sand environments. **Tribology International**, [S. l.], v. 172, n. April, p. 107584, 2022 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107584>

SOLANO-ALVAREZ, W. *et al.* Synchrotron and neural network analysis of the influence of composition and heat treatment on the rolling contact fatigue of hypereutectoid pearlitic steels. **Materials Science and Engineering A**, v. 707, p. 259–269, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.045>

SOLANO-ALVAREZ, W.; FERNANDEZ GONZALEZ, L.; BHADESHIA, H. K. D. H. The effect of vanadium alloying on the wear resistance of pearlitic rails. **Wear**, v. 436–437, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203004>

SOLEIMANI, Hesam; MOAVENIAN, Majid. Tribological Aspects of Wheel–Rail Contact: A Review of Wear Mechanisms and Effective Factors on Rolling Contact Fatigue.

**Urban Rail Transit**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 227–237, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40864-017-0072-2>

SONE, Yasutomo *et al.* Possibility of in situ spectroscopic analysis for iron rust on the running band of rail. **Wear**, [S. l.], v. 265, n. 9, p. 1396–1401, 2008. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.027>

STACHOWIAK, Gwidon; BATCHELOR, Andrew. **Engineering Tribology**. 4th Edition. [S. l.: s. n.]. E-book.

STOCK, R.; PIPPAN, R. RCF and wear in theory and practice—The influence of rail grade on wear and RCF. **Wear**, [S. l.], v. 271, n. 1, p. 125–133, 2011. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.015>

STRÁŽOVEC, Peter *et al.* Detection of residual stress in a railway wheel. **Transportation Research Procedia**, [S. l.], v. 40, p. 898–905, 2019. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.126>

SUZUMURA, Junichi *et al.* In situ X-ray analytical study on the alteration process of iron oxide layers at the railhead surface while under railway traffic. **Wear**, [S. l.], v. 271, n. 1, p. 47–53, 2011. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.054>

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>

TRESSIA, Gustavo *et al.* Effect of in-service work hardening on the sliding wear resistance of a heavy haul rail in the gauge corner. **Wear**, [S. l.], v. 482–483, p. 203979, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203979>

TYFOUR, W. R.; BEYNON, J. H.; KAPOOR, A. The steady state wear behaviour of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions. **Wear**, [S. l.], v. 180, n. 1, p. 79–89, 1995. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)06533-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)06533-0)

VALE. **Análise de Campo**. [S. l.: s. n.].

VARGOLICI, O. *et al.* Influence of the initial surface state of bodies in contact on the formation of white etching layers under dry sliding conditions. **Wear**, , v. 366–367, p. 209–216, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.06.023>

VASIC, Gordana; FRANKLIN, Francis. J.; FLETCHER, David I. Influence of partial slip and direction of traction on wear rate in wheel-rail contact. **WEAR**, v. 270, n. 3–4, p. 163–171, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.012>

VERNERSSON, T. Temperatures at railway tread braking. Part 1: Modelling. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, [S. l.], v. 221, n. 2, p. 167–182, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1243/0954409JRRT57>

VOLTR, P.; LATA, M. Transient wheel-rail adhesion characteristics under the cleaning effect of sliding. **Vehicle System Dynamics**, [S. l.], v. 53, n. 5, p. 605–618, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.961488>

WALLENTIN, M.; BJARNEHED, H. L.; LUNDÉN, R. Cracks around railway wheel flats exposed to rolling contact loads and residual stresses. **Wear**, [S. l.], v. 258, n. 7, p. 1319–1329, 2005. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.041>

WANG, W. J. *et al.* Study on the adhesion behavior of wheel/rail under oil, water and sanding conditions. **Wear**, [S. l.], v. 271, n. 9–10, p. 2693–2698, 2011 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.019>

WANG, W. J. *et al.* Experimental study on adhesion behavior of wheel/rail under dry and water conditions. **Wear**, [S. l.], v. 271, n. 9–10, p. 2699–2705, 2011 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.070>

WANG, W. J. *et al.* Sub-scale simulation and measurement of railroad wheel/rail adhesion under dry and wet conditions. **Wear**, [S. l.], v. 302, n. 1–2, p. 1461–1467, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.014>

WANG, W. J. *et al.* Influence of friction modifiers on improving adhesion and surface damage of wheel/rail under low adhesion conditions. **Tribology International**, [S. l.], v. 75, p. 16–23, 2014 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.03.008>

WANG, W. J. *et al.* Wear and damage transitions of wheel and rail materials under various contact conditions. **Wear**, v. 362–363, p. 146–152, 2016 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.021>

WANG, W. J. *et al.* The role of lanthanum oxide on wear and contact fatigue damage resistance of laser cladding Fe-based alloy coating under oil lubrication condition. **Tribology International**, [S. l.], v. 94, p. 470–478, 2016 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.017>

WANG, W. J. *et al.* Investigation on Wear Resistance and Fatigue Damage of Laser Cladding Coating on Wheel and Rail Materials under the Oil Lubrication Condition. **Tribology Transactions**, [S. l.], v. 59, n. 5, p. 810–817, 2016 c. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1107926>

WANG, W. J. *et al.* Investigation on adhesion characteristic of wheel/rail under the magnetic field condition. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, [S. l.], v. 230, n. 5, p. 611–617, 2016 d. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1350650115606480>

WANG, W. J. *et al.* The role of slip ratio in rolling contact fatigue of rail materials under wet conditions. **Wear**, [S. l.], v. 376–377, p. 1892–1900, 2017 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.049>

WANG, W. J. *et al.* Influence of Different Application of Lubricants on Wear and Pre-existing Rolling Contact Fatigue Cracks of Rail Materials. **Tribology Letters**, [S. l.], v. 65, n. 2, 2017 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0841-9>

WANG, Wen-jian *et al.* Experimental study on the wear and damage behavior of different wheel/rail materials. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, [S. l.], v. 230, n. 1, p. 3–14, 2014 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954409714524566>

WATSON, Michael *et al.* An analysis of the quality of experimental design and reliability of results in tribology research. **Wear**, [S. l.], v. 426–427, p. 1712–1718, 2019. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.028>

WHITE, B.; LEWIS, R. Simulation and understanding the wet-rail phenomenon using twin disc testing. **Tribology International**, v. 136, p. 475–486, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.067>

ZAPATA, D.; JARAMILLO, J.; TORO, A. Rolling contact and adhesive wear of bainitic and pearlitic steels in low load regime. **Wear**, [S. l.], v. 271, n. 1–2, p. 393–399, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.009>

ZENG, D. *et al.* Influence of laser dispersed treatment on rolling contact wear and fatigue behavior of railway wheel steel. **Materials and Design**, v. 54, p. 137–143, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.041>

ZENG, D. *et al.* Investigation on rolling contact fatigue of railway wheel steel with surface

defect. **Wear**, v. 446–447, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203207>

ZENG, Dongfang *et al.* Optimization of strength and toughness of railway wheel steel by alloy design. **Materials & Design**, [S. l.], v. 92, p. 998–1006, 2016. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.096>

ZENG, Dongfang *et al.* Influence of solid solution strengthening on spalling behavior of railway wheel steel. **Wear**, [S. l.], v. 372–373, p. 158–168, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.025>

ZHANG, Shu-yue *et al.* Study on wear and rolling contact fatigue behaviours of defective rail under different slip ratio and contact stress conditions. **Tribology International**, [S. l.], v. 169, p. 107491, 2022. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107491>

ZHANG, Yang; LIAN, Qinglin; WANG, Xi. Enhancement of rolling contact fatigue performance of ferrite-pearlite steel with laser shock peening. **ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING**, v. 11, n. 5, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1687814019850945>

ZHAO, X. J. *et al.* Effects of decarburization on the wear resistance and damage mechanisms of rail steels subject to contact fatigue. **Wear**, [S. l.], v. 364–365, p. 130–143, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.07.013>

ZHAO, X. J. *et al.* Effect of spherical dents on microstructure evolution and rolling contact fatigue of wheel/rail materials. **Tribology International**, [S. l.], v. 127, p. 520–532, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.001>

ZHAO, Xin *et al.* The initiation of local rolling contact fatigue on railway wheels: An experimental study. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 132, n. July 2019, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105354>

ZHOU, G. *et al.* Fatigue damage mechanism of railway wheels under lateral forces. **Tribology International**, [S. l.], v. 91, p. 160–169, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.008>

ZHOU, L. *et al.* Study on the wear and damage behaviors of hypereutectoid rail steel in low temperature environment. **Wear**, [S. l.], v. 456–457, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203365>

ZHOU, Liang *et al.* Study of rolling-sliding contact damage and tribo-chemical behaviour

of wheel-rail materials at low temperatures. **Engineering Failure Analysis**, [S. l.], v. 134, p. 106077, 2022. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106077>

ZHOU, Y. *et al.* Slippage effect on rolling contact wear and damage behavior of pearlitic steels. **Wear**, v. 362–363, p. 78–86, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.001>

ZHOU, Yan *et al.* Slippage effects on the crack behavior of pearlitic steel induced via rolling-sliding friction. **Wear**, [S. l.], v. 482–483, p. 203959, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203959>

ZHU, W. T. *et al.* Wear and damage transitions of two kinds of wheel materials in the rolling-sliding contact. **Wear**, [S. l.], v. 398–399, p. 79–89, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.11.023>

ZHU, Y. *et al.* A study on iron oxides and surface roughness in dry and wet wheel-rail contacts. **Wear**, [S. l.], v. 328–329, p. 241–248, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.025>

ZHU, Y. *et al.* Study on wear and RCF performance of repaired damage railway wheels: Assessing laser cladding to repair local defects on wheels. **Wear**, v. 430–431, p. 126–136, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.028>

ZHU, Yi. The influence of iron oxides on wheel–rail contact: A literature review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, [S. l.], v. 232, n. 3, p. 734–743, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954409716689187>

ZHU, Yi; YANG, Huayong; WANG, Wenjian. Twin-disc tests of iron oxides in dry and wet wheel–rail contacts. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, [S. l.], v. 230, n. 4, p. 1066–1076, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954409715575093>

ZIN, V. *et al.* Effect of external magnetic field on tribological properties of goethite (a-FeOOH) based nanofluids. **Tribology International**, [S. l.], v. 127, p. 341–350, 2018. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.06.023>