

RINA MARIANE ALVES DUTRA

**Controle e validação de um microtribômetro
instrumentado para observar a evolução da marca
de desgaste via microscopia óptica**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

RINA MARIANE ALVES DUTRA

**Controle e validação de um microtribômetro
instrumentado para observar a evolução da marca
de desgaste via microscopia óptica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior

Uberlândia – MG

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

D978c
2017

Dutra, Rina Mariane Alves, 1990-
Controle e validação de um microtribômetro instrumentado para
observar a evolução da marca de desgaste via microscopia óptica / Rina
Mariane Alves Dutra. - 2017.
85 f. : il.

Orientador: Washington Martins da Silva Junior.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Tribologia - Teses. 3. Desgaste
mecânico - Teses. I. Silva Junior, Washington Martins da, 1977- II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

*Aos meus pais, irmãs,
cunhado e namorado.
Vocês são tudo para mim!*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Mestrado.

Ao meu orientador, prof. Washington Martins da Silva Júnior, obrigada pela orientação e ensino.

Aos meus colegas do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), pelo conhecimento compartilhado e pela convivência. Em especial, ao Leonardo Rosa Ribeiro da Silva e Vinícius Carvalho Telles, por todo auxílio e colaboração no desenvolvimento deste estudo. Ao José Lúcio Gonçalves Júnior, por disponibilizar as amostras e aos alunos de iniciação do LTM por toda contribuição.

Aos técnicos Ângela, Quirino e Profeta, agradeço pela indispensável dedicação e competência. Às secretárias Lucimara e Cris, obrigada pela atenção e auxílio na parte burocrática.

Aos Laboratórios de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e Metrologia Dimensional (LMD) pela colaboração.

À banca avaliadora, Márcio Bacci da Silva e Cherlio Scandian, pela disponibilidade e conhecimento repartido.

Aos meus pais, Leiva Dutra e Nivaldo Dutra, pelo apoio e amor incondicional. Às minhas irmãs, Renata e Rafaela, pelo carinho e pela crença. Ao meu cunhado, Wesley Penido, pela força e amizade. Ao meu namorado, Luccas, por ser minha serenidade e minha motivação.

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo financiamento.

“É pelo trabalho que a mulher vem diminuindo a distância que a separava do homem, somente o trabalho poderá garantir-lhe uma independência concreta.”

Simone de Beauvoir

Dutra, R. M. A.. **Controle e validação de um microtribômetro instrumentado para observar a evolução da marca de desgaste via microscopia óptica.** 2017. 85f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Resumo

Neste trabalho um novo microtribômetro capaz de fazer uma análise visual da superfície de desgaste foi desenvolvido a fim de estudar atrito e desgaste em ensaios de deslizamento com movimento alternado em baixas cargas. Um atuador piezelétrico e um sistema programável permitem o controle da força normal durante o ensaio, uma célula de carga tridimensional é responsável pela medição contínua de carga normal e da força de atrito e um sensor LVDT acoplado ao equipamento mede a posição da amostra durante os ensaios. A alta taxa de aquisição de dados, característica desse sistema, permite a geração de mapas de triboscopia 3D, onde as cores quantificam o coeficiente de atrito em função da posição dentro da marca de desgaste e do número de ciclos. Adicionalmente, um microscópio óptico, montado no pórtico, captura periodicamente imagens em uma determinada posição da marca de desgaste, mostrando a evolução dos eventos observados durante o processo. A frequência do movimento pode variar entre 0,03 - 2,0 Hz e a força normal aplicada 0,3 - 13 N. Com a finalidade de validar esse dispositivo, o coeficiente de atrito, os mecanismos de desgaste e o volume desgastado foram comparados com os ensaios realizados em um tribômetro comercial e, para tanto, foi utilizado um aço VC10 revestido quimicamente cm níquel químico como amostra. Em ambos os tribômetros, os parâmetros de frequência, força normal e amplitude foram definidos com 2,0 Hz, 9,81 N e 10 mm, respectivamente. O contracorpo utilizado foi uma esfera de aço SAE 52100 com 5,0 mm de diâmetro. Os resultados mostraram que este novo microtribômetro fornece mecanismos de desgaste, coeficiente de atrito e volume desgastado semelhantes quando comparado ao tribômetro comercial, garantindo uma boa confiabilidade para ensaios tribológicos. Após a validação do equipamento, mapas de triboscopia e capturas de imagens foram utilizados para monitorar e analisar a evolução das trilhas de desgaste produzidas durante os ensaios de deslizamento alternado.

Palavras-chave: microtribômetro, deslizamento com movimento alternado, triboscopia, atrito, microscopia óptica.

Dutra, R. M. A.. **Design and development of an instrumented microtribometer to monitor the evolution of the wear mark via optical microscopy.** 2017. 85f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Abstract

A new microtribometer capable of performing an optical analysis of the wear interface was developed in order to study friction and wear in low load reciprocating sliding wear tests. A piezoelectric actuator and a programmable system allow normal force control during the test. A tridimensional load cell is responsible for continuous measurement of normal load and frictional force. An LVDT sensor coupled to the sample driving apparatus measures the position of the sample during testing. This system's characteristic high data acquisition rate allows the generation of 3D triboscopy maps, in which the colours quantify the friction coefficient according to the position within the wear mark and the number of cycles. Furthermore, an optical microscope mounted in the portico periodically captures images in a particular wear mark position showing the evolution of the events observed during the wear process. The frequency of the movement may vary between 0.03 to 2.0 Hz and the normal load applied from 0.3 to 13 N. In order to validate this device the friction coefficient, the wear mechanisms and the worn volume were compared with tests performed in a commercial tribometer. A VC10 steel chemically coated with nickel was used as sample. In both tribometers the frequency, load and amplitude parameters were set as 2.0 Hz, 9.81 N and 10 mm respectively. The counterbody was an AISI 52100 steel ball with 5.0 mm diameter. Results showed that this new microtribometer provides similar wear mechanisms, friction coefficient and worn volume when compared to the commercial tribometer, ensuring good reliability for tribological tests. After the equipment validation, triboscopy maps and image captures were used to monitor and analyze the evolution of the wear tracks produced during the sliding reciprocating tests.

Keywords: microtribometer, reciprocating sliding, triboscopy, friction, optical microscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Ensaio de deslizamento com movimento alternado. Adaptado de MILAN et al. (2005).....	5
Figura 2.2. Diferentes separações de superfícies. (a) Ruptura interna das juntas, (b) Ruptura do material mais macio A. (c) Ruptura predominante do material mais macio A, mas também presente no material B. (d) Ruptura igual em ambos os materiais. Adaptado de ZUM GAHR (1987).....	6
Figura 2.3. Teorias de adesão. Adaptado de ZUM GAHR (1987).....	7
Figura 2.4. Diagrama esquemático do processo de iniciação e propagação de trincas por fadiga. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2005).....	8
Figura 2.5. Diagrama ilustrando um caminho onde fragmentos de materiais podem resultar de deformação plástica nos picos das asperidades. Adaptado de KAYABA e KATO (1981).....	8
Figura 2.6. Formação de uma partícula de transferência por ruptura de aspereza e agregação. Adaptado de SASSADA (1984).....	9
Figura 2.7. Cinética da oxidação metálica em altas temperaturas. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2005).....	10
Figura 2.8. Geometria básica dos ensaios de deslizamento a seco ou lubrificado. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2004).....	11
Figura 2.9. Representação das forças responsáveis pelo coeficiente de atrito. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2004).....	12
Figura 2.10. Esquema ilustrando o conceito do coeficiente de atrito. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2004).....	13
Figura 2.11. Esquema ilustrando o efeito do ângulo de inclinação da amostra sobre a força de atrito aparente. (a) Caso ideal. (b) Plano inclinado. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2004).....	14
Figura 2.12. Análise do perfil topográfico da trilha de desgaste via perfilometria: (a) Método. Adaptado de WENNERBERG e ALBREKTSSON (2000). (b) Representação	16

topográfica do perfil obtido.....	
Figura 2.13. Relação entre o sinal LVDT e a posição na pista de desgaste. Adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015).....	17
Figura 2.14. Matriz utilizada para interpretar os dados amostrados através da triboscopia. Adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015).....	18
Figura 2.15. Mapa 3D típico para disco com partículas lubrificantes. Adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015).....	19
Figura 3.1. Etapas desenvolvidas nessa dissertação.....	22
Figura 3.2. Microestrutura do corpo de prova antes do revestimento (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).....	23
Figura 3.3. Revestimento NiP da amostra retificada (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).	24
Figura 3.4. Etapas do projeto microtribômetro.....	25
Figura 3.5. Microtribômetro. (a) Esquema e principais instrumentos. (b) Equipamento.....	26
Figura 3.6. Penetrador padrão Brinell 5,0 mm.....	26
Figura 3.7. Posicionamento da mesa móvel nas extremidades do movimento alternado. (a) Amplitude mínima. (b) Amplitude máxima.....	27
Figura 3.8. Guias lineares e disco que determina a posição do pino excêntrico.....	28
Figura 3.9. Posicionamento do porta amostra. (a) Durante o ensaio de deslizamento, (b) Durante a aquisição da imagem.....	29
Figura 3.10. Curva de calibração da célula de carga.....	30
Figura 3.11. Curva de calibração do LVDT para uma trilha de 10 mm.....	31
Figura 3.12. Definição da inclinação da superfície da amostra.....	32
Figura 3.13. Exemplo de medição da diagonal da identação realizada com força normal 4,903 N e comparação entre equipamentos. (a) Microtribômetro. (b) Microdurômetro.....	32
Figura 3.14. Tribômetro Universal Plint TE 67®. (a) Modelo esquemático do ensaio tribológico. Adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015). (b)	33

Equipamento.....	
Figura 3.15. Fluxograma do processo de validação da metodologia proposta.....	34
Figura 3.16. Medição da área desgastada da seção transversal da trilha de desgaste.....	37
Figura 3.17. Representação da calota esférica desgastada no contracorpo.....	38
Figura 3.18. Matriz utilizada para interpretar os dados amostrados do ensaio através da triboscopia. Adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015).....	38
Figura 3.19. Mapa de triboscopia de um ensaio realizado no equipamento microtribômetro.....	39
Figura 3.20. (a) Coeficiente de atrito médio. (b) Força normal média de um ensaio realizado no equipamento microtribômetro.....	40
Figura 4.1. Gráfico correlacionando a diagonal média com a carga. Aço ABNT 1020.....	43
Figura 4.2. Fluxograma do programa de desgaste por deslizamento com movimento alternado.....	45
Figura 4.3. Tela do programa principal - LabView®.....	46
Figura 4.4. Exemplo de uma tela da sequência de programação do controle do carregamento - LabView®.....	47
Figura 4.5. Curva de força normal média ao longo dos ciclos de cada ensaio do microtribômetro. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.....	49
Figura 4.6. Triboscopia mostrando a variação da força normal ao longo da posição na trilha de desgaste e ao longo do tempo de ensaio. Ensaio M1. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.....	50
Figura 4.7. Curva de força normal média ao longo dos ciclos dos ensaios M1 e M3. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.....	51
Figura 4.8. Imagens via MEV-BSE da marca de desgaste observada na posição central da trilha para ensaio de deslizamento com movimento alternado via microtribômetro (a)	52

M1, (c) M2, (e) M3, e via Plint® (b) P1, (d) P2, (f) P3. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.....	
Figura 4.9. Posição central da trilha do ensaio M2 utilizando o microtribômetro identificando a formação da tribocamada. MEV-BSE. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.....	53
Figura 4.10. Análise química na posição central da trilha do ensaio M2 realizado no microtribômetro identificando a formação da tribocamada. MEV-EDX. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.....	55
Figura 4.11. Análise química via EDX na posição central da trilha do ensaio P3 realizado no tribômetro Plint® identificando a formação da tribocamada. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.....	56
Figura 4.12. Análise química via EDX do contracorpo identificando a formação da tribocamada. (a) Ensaio M2. (b) Ensaio P3. Aço SAE 52100 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.....	58
Figura 4.13. Microscopia óptica da amostra na posição central da trilha do ensaio (a) M2, (b) P3. Corpo: Aço VC10 com revestimento de níquel químico.....	59
Figura 4.14. Microscopia óptica do contracorpo (c) M2 e (d) P3. Aço SAE 52100. 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.....	59
Figura 4.15. Média do volume desgastado da amostra dos ensaios realizados no microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.....	60
Figura 4.16. Média do volume desgastado dos contracorpos dos ensaios realizados no microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®. Aço SAE 52100, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.....	61
Figura 4.17. Média do volume desgastado do par dos ensaios realizados no microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®. Aço VC10 com revestimento de níquel químico e contracorpo SAE 52100, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200	61

ciclos.....	
Figura 4.18. Coeficiente de atrito médio registrado no regime permanente nos ensaios realizados no microtribômetro e no tribômetro Plint®. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.....	62
Figura 4.19. Coeficiente de atrito médio dos ensaios realizados no microtribômetro. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.....	63
Figura 4.20. Coeficiente de atrito médio dos ensaios realizados no tribômetro Plint®. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.....	64
Figura 4.21. Coeficiente de atrito médio dos ensaios realizados no Microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.....	65
Figura 4.22. Mapas de triboscopia dos ensaios (a) M2 e (b) P3 realizados no microtribômetro e na Plint®, respectivamente. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.....	66
Figura 4.23. Coeficiente de atrito dos ensaios M2 e P3 realizados no microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®, respectivamente. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.....	67
Figura 4.24. Mapa de triboscopia do ensaio M1. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.....	67
Figura 4.25. Evolução da trilha de desgaste. Amostra de aço VC10 revestida com níquel químico, força normal 9,81 N, frequência 2 Hz, ao ar. (a) ciclo 0, distância percorrida 0 m. (b) ciclo 1080, 21,6 m. (c) ciclo 2160, 43,2 m. (d) ciclo 3240, 64,8 m. (e) ciclo 4320, 86,4 m. (f) ciclo 5400, 108,0 m.....	69
Figura 4.26. Evolução da trilha de desgaste com a presença de um defeito. Amostra de aço VC10 revestida com níquel químico, força normal 9,81 N, frequência 2 Hz, ao ar. Identação de 20 N. (a) ciclo 0, distância percorrida 0 m. (b) ciclo 1440, 28,8 m. (c) ciclo 2880, 57,6 m. (d) ciclo 4320, 86,4 m. (e) ciclo 5760, 115,2 m. (f) ciclo 7200, 144,0 m.....	70
Figura 4.27. Mapa de triboscopia do ensaio na amostra com a presença do defeito. Aço	72

VC10 revestido com níquel químico, força normal 9,81 N, frequência 2 Hz, ao ar. (a) Mapa de triboscopia completo. (b) Zoom na região entre -1 a 1 mm nos 400 primeiros ciclos. (c) Zoom na região entre -1 e 1 mm nos 60 primeiros ciclos.....

Figura 4.28. Coeficiente de atrito médio do ensaio na amostra do aço VC10 revestido com níquel químico, força normal 9,81 N, frequência 2 Hz, ao ar..... 73

Figura AI.1. Fluxograma da preparação do ensaio..... 81

Figura AII.1. Fluxograma detalhado do programa de desgaste por deslizamento com movimento alternado..... 83

Figura AIII.1. Tela de programação do sistema de segurança..... 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química da amostra VC10 (porcentagem em peso) (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).....	23
Tabela 3.2. Componentes do microtribômetro.....	30
Tabela 3.3. Ensaios de validação.....	35
Tabela 3.4. Parâmetros do ensaios experimentais.....	35
Tabela 3.5. Parâmetros do ensaio experimental apresentando a evolução da trilha.....	41
Tabela 4.1. Faixa de trabalho do microtribômetro.....	44

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AD/DA: analógico-digital/digital-analógico

ANSI: American National Standards Institute

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

BSE: elétrons retroespalhados

d : diagonal da esfera

EDX: espectroscopia dispersiva de raios X

F : força de atrito

F_m : força horizontal medida

F_n : força normal

F_t : força transversal

F_y : força normal real

GPIB: *General Purpose Interface Bus*

h : altura

h_1 : altura 1

h_2 : altura 2

IEEE: Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

LVDT: *Linear Variable Differential Transformer*

M: número de larguras de contato

MEV: microscopia eletrônica de varredura

MO: microscopia ótica

N : é o número de ciclos do movimento de vaivém

NiP: níquel químico

PM: ponto morto

PZT: atuador piezelétrico

r : raio da calota esférica desgastada

Sq: rugosidade superficial quadrática média

USB: Universal Serial Bus

V : volume total desgastado da esfera

W : força aplicada

μ : coeficiente de atrito

γ : ângulo de inclinação

θ : ângulo de inclinação

\textcircled{R} : registrado

2D: duas dimensões

3D: três dimensões

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Desgaste por deslizamento	4
2.2 Mecanismos de desgaste	6
2.3 Tribômetros	10
2.3.1 Medição do coeficiente de atrito em tribômetros	12
2.3.2 Medição do desgaste	15
2.4 Triboscopia	16
2.4.1 Efeitos de imperfeições na triboscopia	19
2.5 Objetivos	21
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	22
3.1 Materiais – preparação da amostra	23
3.2 Microtribômetro	25
3.2.1 Calibração dos instrumentos	30
3.2.2 Nivelamento da amostra	31
3.2.3 Faixa operacional da força normal	32
3.3 Ensaio por deslizamento com movimento alternado	33
3.3.1 Validação da metodologia proposta	33
3.4 Caracterização morfológica	36
3.5 Análise do volume desgastado	36
3.6 Análise do volume desgastado do contracorpo – MO	37
3.7 Triboscopia	38
3.8 Ensaios de potencialidade do método desenvolvido	39
3.8.1 Efeito de imperfeições e captura de imagens	39

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 Aspectos construtivos do microtribômetro, programação e controle da simulação	42
4.1.1 Rotina de ensaio e programação	44
4.2 Validação do equipamento	48
4.2.1 Controle da força normal	48
4.2.2 Caracterização superficial e mecanismos de desgaste	51
4.2.3 Volume desgastado	59
4.2.4 Coeficiente de atrito e triboscopia	62
4.2.5 Evolução da trilha de desgaste	68
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	74
CAPÍTULO 6 – TRABALHOS FUTUROS	76
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXOS	81
ANEXO I - Método para fixação e posicionamento da amostra.....	81
ANEXO II - Fluxograma detalhado do programa de controle.....	83
ANEXO III - Sistema de segurança.....	85

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A Tribologia foi definida pelo estudo de JOST (1966) em um relatório (para o comitê do departamento inglês de educação e ciência) como “ciência e tecnologia das superfícies interagindo em movimento relativo e das práticas de assuntos associados”. Desde então, aplica-se tribologia para análise de atrito, desgaste e lubrificação, visando a redução de custos na manutenção e perda de material, além da otimização na escolha dos materiais utilizados no sistema tribológico e a previsão de suas durabilidades. Mas, também, para sistemas onde elevado coeficiente de atrito e desgaste são importantes. O estudo vem intensificando-se com o aumento da preocupação ambiental e a busca por menores gastos da indústria.

Em trabalhos anteriores, (EZZAT, 1993; DE MELLO ;HUTCHINGS, 2001; MILAN et al., 2005), foram desenvolvidas metodologias que estabelecem a utilização do ensaio de desgaste por deslizamento com movimento alternado para representar os mecanismos de desgaste de sistemas mecânicos que constituíam gargalos para o desenvolvimento tecnológico de alguns setores da indústria, tais como: cilindros de laminação (MILAN et al., 2005); pistões de compressores de refrigeradores (DE MELLO ;HUTCHINGS, 2001), entre outros. Em todos os casos, o desempenho do par tribológico depende da análise dos mecanismos de desgaste predominantes no sistema.

O estudo dos fenômenos que ocorrem durante esse contato tribológico é complexo visto que as interações nele são irreversíveis, sistêmicas e evoluem com o tempo, em suma, são particularidades de cada sistema. Durante o contato tribológico, há alteração nas condições iniciais que modificam as características das superfícies de contato e contribuem para uma possível formação de uma tribocamada na superfície, tornando a modelagem complexa (DOS SANTOS; COSTA;DE MELLO, 2015). Sendo assim, uma forma de avaliar os fenômenos desse processo é através do estudo das principais respostas do sistema tribológico, que são o atrito e o desgaste.

Dessa maneira, os tribômetros são uma tecnologia muito utilizada no estudo desses fenômenos. Na análise em campo do atrito e desgaste, essas ocorrências do contato têm

dificuldades e complexidade de medição. Em contrapartida, na análise laboratorial, através dos tribômetros, apresenta grandes vantagens como a facilidade da experimentação, instrumentação e otimização do tempo e dos recursos. O tribômetro é um equipamento no qual os parâmetros são adequados para medição de propriedades das variáveis tribológicas de materiais a seco e lubrificado sob condições específicas de carga, velocidade, temperatura e atmosfera sem distanciar-se das condições reais. Como o atrito e o desgaste são muito sensíveis a essas condições, é essencial que todos esses fatores possam ser cuidadosamente controlados e monitorados, desde que os micromecanismos sejam reproduzidos (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2005).

A técnica da triboscopia auxilia na análise desses parâmetros que, além da ação temporal, são também dependentes da ação espacial avaliada pela técnica. Segundo BELIN e MARTIN (1992a), a triboscopia representa variáveis medidas durante um ensaio tribológico por um método de imagem numérica, considerando a complexidade dos fenômenos tribológicos. A utilização de um sistema de microscopia óptica acoplado ao aparelho, através da técnica de triboscopia, permite a obtenção de imagens da marca de desgaste de um movimento alternado em posições específicas, representando de forma sintética um comportamento da superfície durante o deslizamento. Ao avaliar a força de atrito, é possível identificar a posição e o número de ciclos em que ocorrem alterações na marca de desgaste (BELIN ;MARTIN, 1992b; BELIN, 1993; WAHL; BELIN;SINGER, 1998). Essas mudanças podem resultar de vários fenômenos, tais como: fragmentação e ruptura de revestimentos, oxidação da superfície e presença de partículas de material deformado (WARD, 1970). De fato, vários trabalhos (BELIN ;MARTIN, 1992b; BELIN, 1993; WAHL; BELIN;SINGER, 1998; BERMÚDEZ et al., 2009) mostram conclusões obtidas através de análises de imagens após o deslizamento, mesmo quando a triboscopia mostrou que ocorreram fenômenos ao longo do ensaio.

Assim, a presente dissertação tem por objetivo principal o desenvolvimento estrutural e operacional de um microtribômetro capaz de fazer uma análise visual da superfície de desgaste. As informações obtidas podem ser comparadas com fenômenos identificados durante os ensaios através dos gráficos de triboscopia referentes à força de atrito e com dados gerados através um tribômetro comercial. Essas comparações são suficientes para validação do microtribômetro.

Como objetivos específicos, espera-se:

1 – Avançar no potencial de análise ao obter imagens que mostrem claramente a evolução dos fenômenos interfaciais que ocorrem em ensaios de desgaste por deslizamento com movimento alternado;

2 – Implementar um sistema de controle e aquisição de dados, com calibração adequada para o equipamento;

3 – Analisar a faixa operacional do microtribômetro e desenvolver uma programação capaz de nivelar a amostra;

4 – Gerar uma resposta em tensão característica do sistema que será apresentada em um gráfico típico da triboscopia (distância percorrida x posição ao longo da marca de desgaste x coeficiente de atrito);

5 – Utilizar a triboscopia em conjunto com a captura de imagens para análises de potencialidade do método desenvolvido, como o estudo do efeito de imperfeições, da temperatura de contato e do uso de lubrificantes em ensaios de desgaste com movimento alternado.

Portanto, a motivação dessa dissertação é desenvolver um equipamento que contribua para análise de desgaste e atrito em sistemas com deslizamento alternado através da técnica de triboscopia e da captura de imagens. A triboscopia auxiliará na análise espacial dos fenômenos tribológicos. A aquisição de imagens contribuirá no estudo da evolução e comportamento de pontos específicos durante o deslizamento. Assim, será possível realizar estudos diferenciados de texturização e lubrificação de problemas industriais com melhores técnicas, enriquecendo a metodologia do Laboratório de Tribologia e Materiais – LTM.

A exposição do presente trabalho é feita da seguinte forma. Iniciou-se com uma breve introdução sobre a importância da tribologia e do tribômetro para a ciência, ressaltando os objetivos deste estudo. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos assuntos relacionados ao tema dessa dissertação. A metodologia empregada na construção e validação do microtribômetro é apresentada no terceiro capítulo. No quarto capítulo, são expostos os resultados do desenvolvimento e validação do equipamento construído. As principais conclusões dessa dissertação são apresentadas no quinto capítulo. Encaminhando para o fechamento, o sexto capítulo trata de possíveis trabalhos futuros como continuação da pesquisa desenvolvida nessa dissertação. As referências utilizadas e citadas ao longo do trabalho são listadas no sétimo capítulo. E, por fim, os anexos com informações adicionais à elaboração da programação e montagem do microtribômetro.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre os fundamentos do ensaio e dos parâmetros tribológicos que governam o deslizamento com movimento alternado. O objetivo é edificar as bases do conhecimento necessárias para entender as principais definições em tribologia sobre desgaste por deslizamento com movimento alternado que fundamentam as decisões tomadas acerca do projeto do equipamento microtribômetro e suas limitações.

2.1 DESGASTE POR DESLIZAMENTO

O movimento num desgaste por deslizamento pode ser classificado como contínuo ou alternado. Em um movimento contínuo, as superfícies deslizam uma sobre a outra com movimento relativo em uma única direção, enquanto a direção oscila em determinada frequência no movimento alternado. Consequentemente, o movimento alternado apresenta características, como presença de acelerações positivas e negativas (desacelerações), alternância de velocidade e pontos de repouso. Os mecanismos que possuem esse funcionamento estão sujeitos a um elevado atrito e a grandes forças de inércia, os quais geram vibrações indesejadas que promovem maior desgaste (WARD, 1970). O modelo pino (esfera) no plano, que representa o deslizamento com movimento alternado, está descrito na Fig. 2.1.

O foco em movimento alternado é justificado, uma vez que a maioria das aplicações industriais operam com esse movimento e não se pode estudá-las com base em teorias desenvolvidas para desgaste contínuo (WARD, 1970). São exemplos de aplicações: os motores de combustão interna, as bombas de deslocamento positivo de pistões ou êmbolos, pistões de compressores herméticos de sistemas de refrigeração e cilindros de laminação.

No desgaste por deslizamento, o movimento é dado por dois regimes: o regime transitório (primeira etapa) e o regime permanente (segunda etapa).

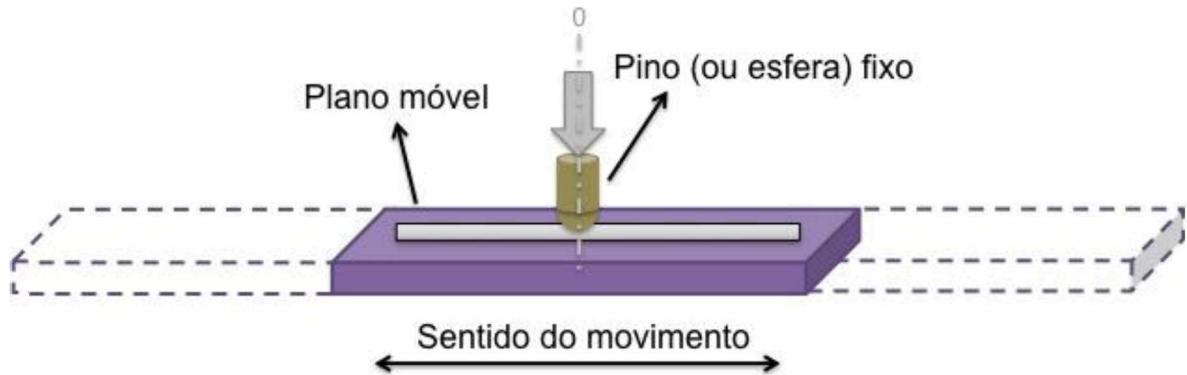


Figura 2.1. Ensaio de deslizamento com movimento alternado. Adaptado de MILAN et al. (2005).

O regime transitório, também denominado *running-in*, é a fase inicial de interação entre duas superfícies. Consiste na instabilidade do coeficiente de atrito através do amaciamento da superfície, com variação significativa da área de contato (ARANGO, 2010). Nessa etapa, o coeficiente de atrito apresenta uma elevação brusca correspondente às impurezas, rugosidade inicial e espécies adsorvidas na superfícies (BLAU, 2005). Consequentemente, ocorrem mudanças na geometria, rugosidade e propriedades físico-químicas do par tribológico (BLAU, 2008). No *running-in*, a pressão de contato é elevada nos instantes iniciais, prevalecendo o mecanismo de desgaste mecânico, como abrasão e adesão. A evolução para o mecanismo triboquímico acontece quando há a redução da pressão de contato, garantindo uma transição de mecanismo no período *running-in* (BLAU, 1981).

Segundo BLAU (2005), o regime transitório é caracterizado por vários parâmetros, como o coeficiente de atrito, a duração ou a velocidade do regime transitório e sua instabilidade que relaciona os eventos microscópicos com a interação entre as superfícies deslizantes. O regime transitório dura até o coeficiente de atrito atingir um valor constante, entrando em regime permanente.

O regime permanente ou estacionário, também chamado de *steady state*, é definido na tribologia como a condição onde há estabilidade no coeficiente de atrito, taxa de desgaste, temperatura do contato, rugosidade superficial, dentre outros parâmetros (BLAU, 2008).

2.2 MECANISMOS DE DESGASTE

As características de qualquer contato tribológico variam de acordo com as condições impostas. Se uma simulação próxima de uma situação prática de desgaste é desejada, então é necessário caracterizar totalmente o contato tribológico. Caracterização significa que todos os fatores de controle de maior impacto são identificados podendo, dessa forma, ter a avaliação das consequências no comportamento do sistema. A fim de alcançar-se uma simulação de ensaio aproximada ao contato tribológico real, a caracterização da parte operacional, material, bem como parâmetros ambientais e lubrificantes deve ser realizada (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2005).

O desgaste das superfícies deslizantes ocorre devido a essas condições impostas que proporcionam mecanismos de desgaste através da variação dos parâmetros do par tribológico (ARANGO, 2010). O desgaste adesivo ocorre quando o contato entre duas superfícies gera união entre as mesmas. Como a continuidade do movimento relativo à separação das superfícies se dá em um local diferente da junção, há a transferência de material entre as superfícies (ZUM GAHR, 1987). A Figura 2.2 apresenta os tipos de separação da superfície.

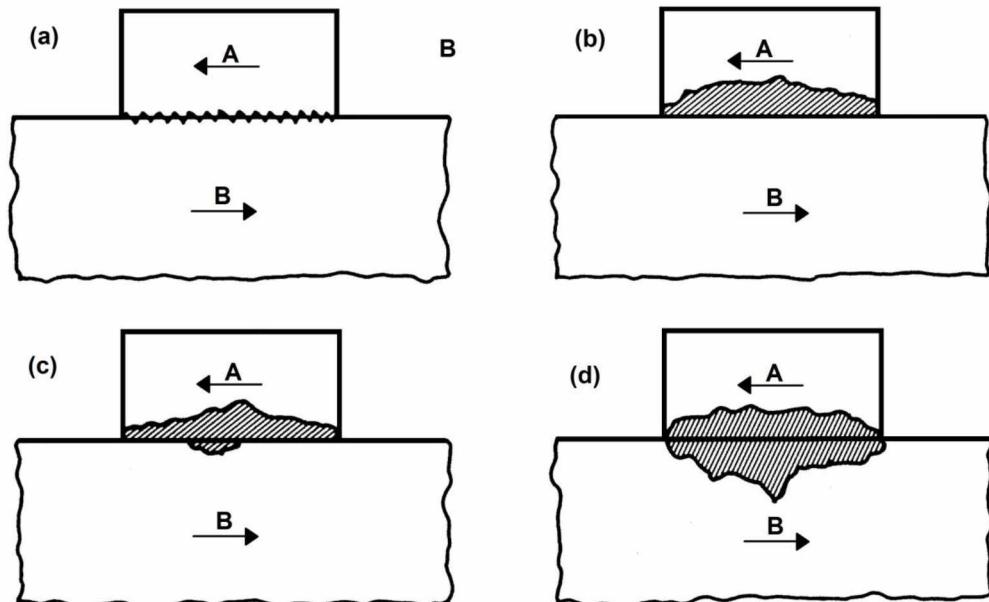


Figura 2.2. Diferentes separações de superfícies. (a) Ruptura interna das juntas, (b) Ruptura do material mais macio A. (c) Ruptura predominante do material mais macio A, mas também presente no material B. (d) Ruptura igual em ambos os materiais. Adaptado de ZUM GAHR (1987).

A severidade da adesão depende de propriedades físico-químicas dos materiais envolvidos no contato, da rugosidade superficial, carga e contaminantes (ZUM GAHR, 1987). As principais teorias desse autor sobre como ocorre a adesão entre as superfícies são: juntas mecânicas, teoria difusional, teoria eletrônica e teoria da adsorção. Cada modelo dependente das características do sistema analisado. A Figura 2.3 apresenta as teorias de adesão.

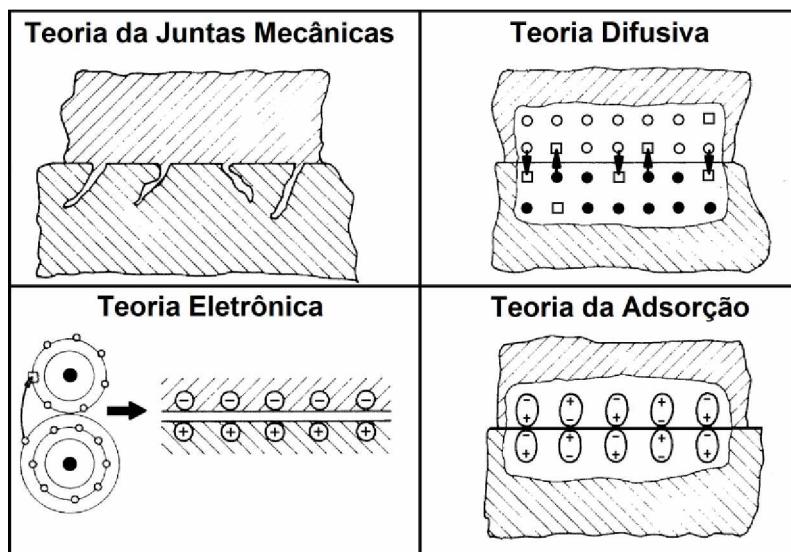


Figura 2.3. Teorias de adesão. Adaptado de ZUM GAHR (1987).

O desgaste por fadiga superficial é definido por ZUM GAHR (1987) como a formação de trincas e destacamento de material, causadas por cargas cíclicas. Danos desta natureza são encontrados, por exemplo, no contato das rodas do trem com o trilho, rolamentos esféricos ou cilíndricos, dentre outros. A fadiga superficial também é notada em conjunto com os mecanismos de abrasão e adesão, pois as asperidades que deslizam ciclicamente sobre a superfície podem causar a formação e propagação de trincas na superfície ou abaixo dela. Um modelo de desgaste por fadiga é exposto na Fig. 2.4.

As primeiras teorias de desgaste por deslizamento sugeriam que o material era removido como partículas aglomeradas ou fragmentos dos picos das asperezas, onde algumas partículas de desgaste apresentam formas e dimensões irregulares apropriadas a esse processo (HUTCHINGS, 1992). A Figura 2.5 representa um exemplo de fluxo plástico em uma asperidade com destacamento de partículas de desgaste.

Nesse caso, o cisalhamento de camadas sucessivas (ao longo do plano AC) ocorre simultaneamente à propagação da trinca por cisalhamento AD. A remoção de material

depende apenas da interação mecânica entre as asperezas (HUTCHINGS, 1992). Um outro modelo de formação de partícula é apresentado na Fig. 2.6.

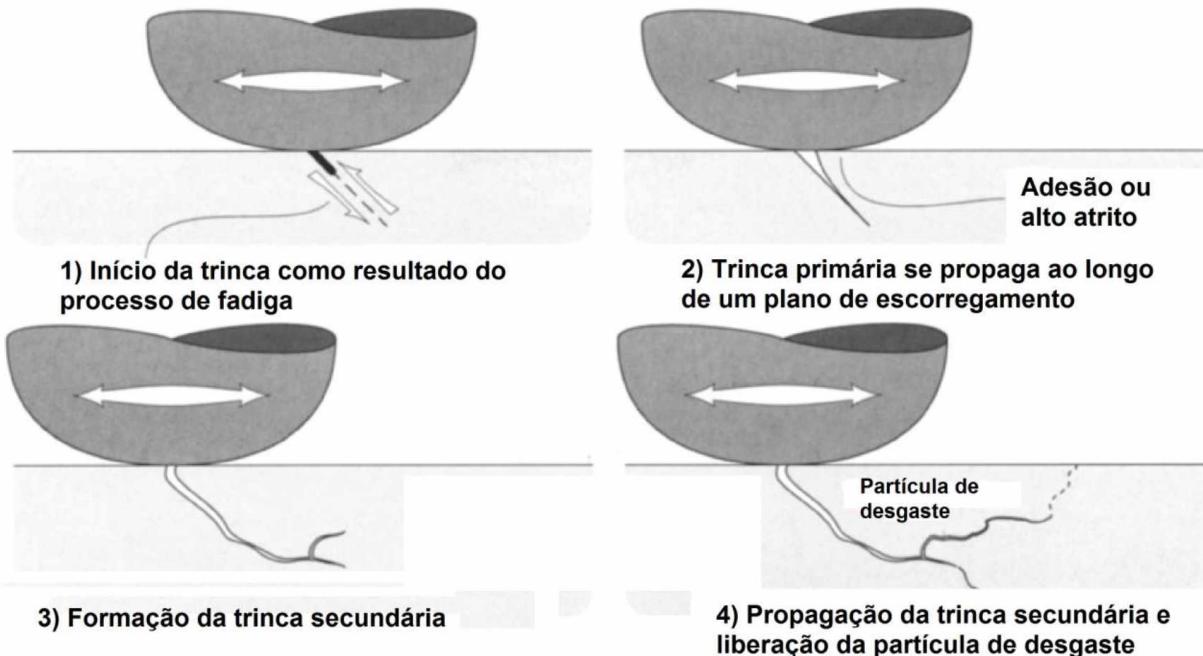


Figura 2.4. Diagrama esquemático do processo de iniciação e propagação de trincas por fadiga. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2005).

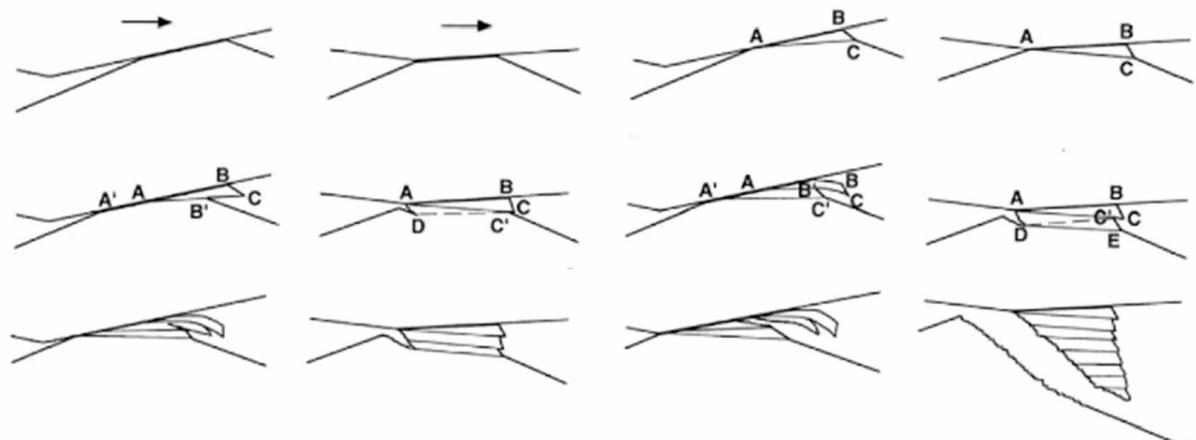


Figura 2.5. Diagrama ilustrando um caminho onde fragmentos de materiais podem resultar de deformação plástica nos picos das asperidades. Adaptado de KAYABA e KATO (1981).

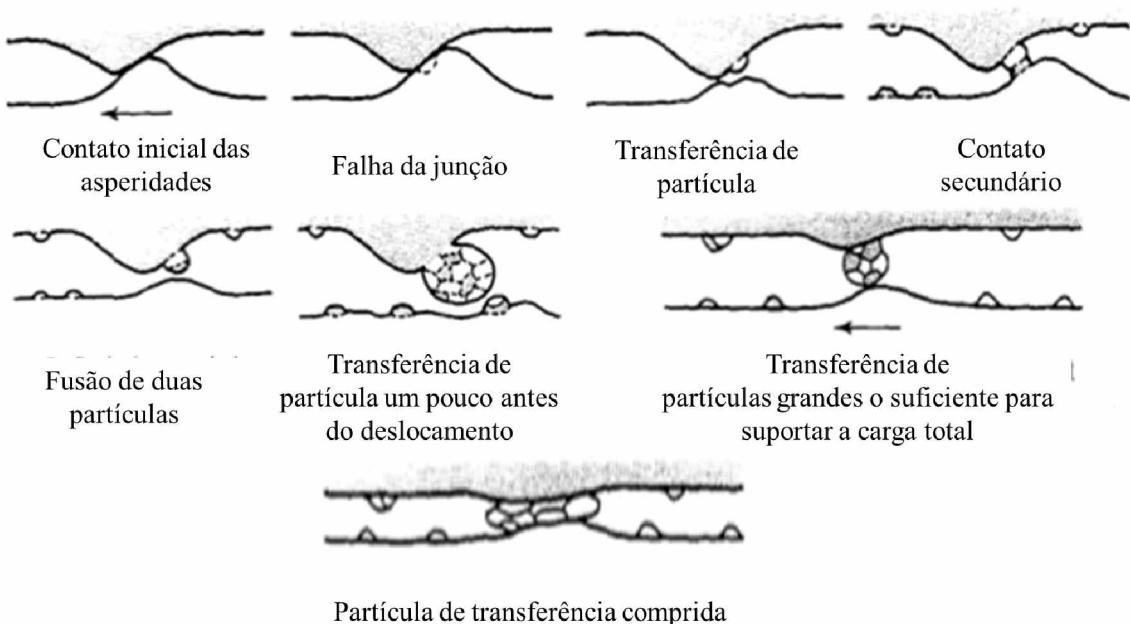


Figura 2.6. Formação de uma partícula de transferência por ruptura de aspereza e agregação.
Adaptado de SASSADA (1984).

O modelo apresentado por SASSADA (1984) propõe que a formação de um fragmento é seguida pela sua transferência para o contracorpo (por adesão), formando uma nova aspereza tanto de material encruado, quanto de óxidos. A continuação do deslizamento gera mais fragmentos que aderem ao inicial formando uma grande partícula. Ao desprender-se, essa partícula será deformada tornando-se laminar (HUTCHINGS, 1992).

O desgaste oxidativo foi definido por QUINN (1971) como o desgaste de metais não lubrificados na presença de ar ou oxigênio, sendo que o oxigênio atmosférico altera radicalmente os coeficientes de atrito e as taxas de desgaste dos metais secos em movimento relativo. Consequentemente, as características do desgaste oxidativo são superfícies de desgaste moderados e pequenos detritos de desgaste oxidado. Isso ocorre, pois o óxido por ser mais duro e mais inerte reduz a deformação plástica da superfície do metal e absorve energia, contribuindo para redução do desgaste e da energia de deformação do metal (QUINN, 1971; STOTT, 1998).

A taxa de oxidação de metais, como esperado para reações químicas, é dependente da temperatura de contato uma vez que a cinética da oxidação da superfície metálica tem uma influência dominante sobre o desgaste oxidativo. A Figura 2.7 apresenta a cinética de oxidação para temperaturas elevadas.

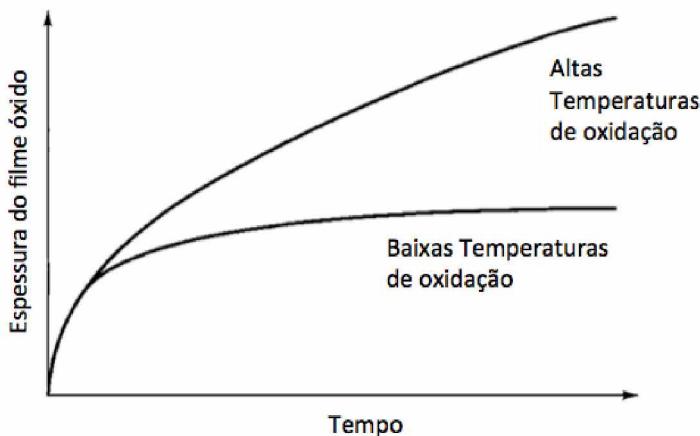


Figura 2.7. Cinética da oxidação metálica em altas temperaturas. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2005).

Para baixas temperaturas ou temperatura ambiente, a oxidação do metal é inicialmente rápida, seguida de passivação da superfície que limita a espessura do filme óxido. O aumento da temperatura provoca rápido movimento de íons metálicos e/ou oxigênio no filme óxido, sendo que a difusão é suficiente para assegurar o transporte de íons necessários para o crescimento do filme (FROMHOLD, 1975).

A formação e o crescimento de um filme óxido razoável suprime os mecanismos regidos pela plasticidade, reduzindo a resistência ao cisalhamento da superfície e, portanto, o desenvolvimento de grandes deformações cisalhantes sub-superficiais.

2.3 TRIBÔMETROS

Tribômetros são os equipamentos utilizados na maioria das investigações tribológicas dado suas vantagens, como a facilidade da experimentação sem as dificuldades que acompanham estudos de desgaste e de atrito ocorrendo no equipamento industrial (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2004). São equipamentos que têm como principal função proporcionar ensaios desses parâmetros sob condições controladas, permitindo a simulação do desgaste em um tempo relativamente menor (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2004; GONÇALVES ;PADOVESE, 2010).

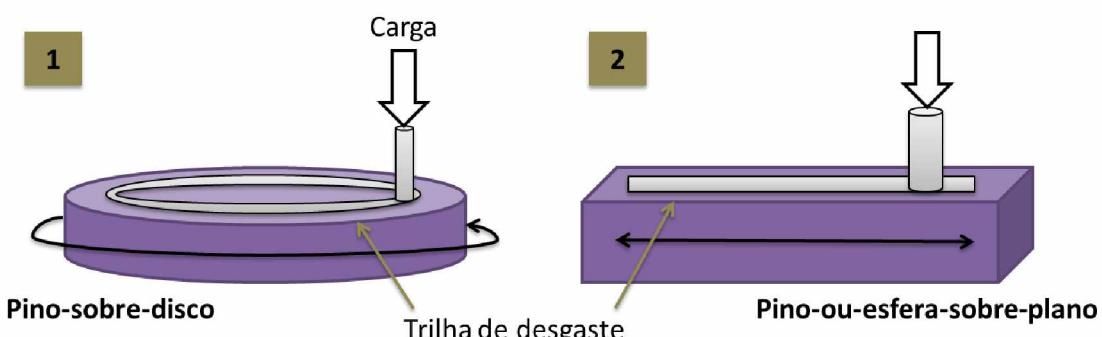
Por exemplo, o desgaste por deslizamento com movimento alternado entre os cilindros e pistões é de considerável importância econômica. Ensaios em grande escala sobre motores

de combustão interna são limitados pelo tempo e recursos e, por isso, muitos ensaios preliminares de análise de lubrificante são executados em dispositivos de ensaio simplificados. Um tribômetro adequado pode simular todas as características essenciais de um problema entre cilindros e pistões, sem as dificuldades associadas com a experimentação no equipamento real. Inversamente, um tribômetro mal projetado ou selecionado pode fornecer falsos resultados que dificultam uma análise tribológica do ensaio estudado (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2004).

O requisito básico para uma boa concepção de um novo tribômetro é a rigidez mecânica suficiente para evitar a vibração, principalmente, quando há uma força de atrito oscilando rapidamente. Além disso, deve-se assegurar que a carga aplicada não varie muito sobre uma superfície áspera da amostra. Em muitos casos, a aplicação de um peso morto conectado a uma mola é suficiente para garantir eficácia no valor da carga inserida. Se não houver nenhuma suspensão para o peso, então a força de contato irá variar de acordo com a rugosidade de superfície ou a transferência de filmes impostas pelo movimento do contato (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2004).

Uma vez que o tipo de desgaste aplicado é selecionado, o modelo apropriado de equipamento pode ser escolhido. Os tribômetros têm várias características em comum: permitem a fixação e o apoio do par tribológico; permitem o deslizamento do par de modo controlado; proporcionam a aplicação da força normal e a medição da magnitude da força de atrito tangencial (BLAU, 2008).

A Figura 2.8 apresenta duas geometrias comuns de tribômetros disponíveis para ensaios de deslizamento que se diferenciam pelas características básicas (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2004).



O item 1 da Fig. 2.8 refere-se ao ensaio de deslizamento contínuo *pino-sobre-disco* em que um carregamento sob pino encontra-se sobre um disco rotacional. O item 2 representa o ensaio de deslizamento com movimento alternado *pino-ou-esfera-sobre-plano*, no qual a carga é aplicada no pino (ou esfera) que está em contato com um bloco deslizante. Esse último representa o modelo do Microtribômetro desenvolvido nessa dissertação.

A caracterização tribológica envolve estudos sobre os aspectos práticos do material bem como estudos sobre o coeficiente de atrito, taxa de desgaste e durabilidade do filme. Diversos ensaios podem ser realizados, tais como o de deslizamento, de identação e o de fadiga. O presente estudo focará em desgaste por deslizamento com movimento alternado em temperatura ambiente.

2.3.1 Medição do coeficiente de atrito em tribômetros

Charles Coulomb (1736-1806) definiu a força de atrito como a força que representa uma resistência ao corpo que está em movimento sobre outro corpo (HUTCHINGS, 1992). Nos ensaios de deslizamento com movimento alternado no microtribômetro, o movimento linear do deslizamento do plano em contato com um pino (ou esfera) provoca essa força de atrito. Consequentemente, o coeficiente de atrito (μ) é deduzido a partir da razão das medições da força de atrito (F) e da força aplicada (W), conforme Fig. 2.9, sendo dado por:

$$\mu = \frac{F}{W} \quad \text{Equação 2.1}$$

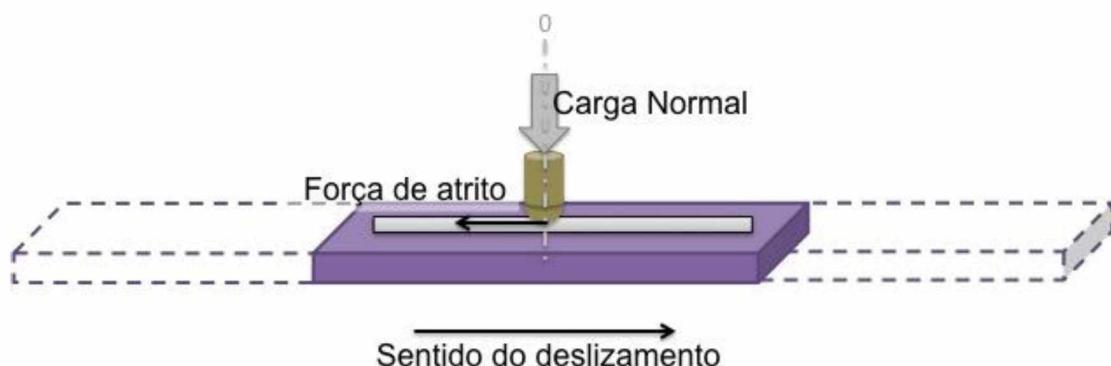


Figura 2.9. Representação das forças responsáveis pelo coeficiente de atrito. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2004).

A Figura 2.10 conceitua o coeficiente de atrito e sua dependência com a força normal no deslizamento com movimento alternado.

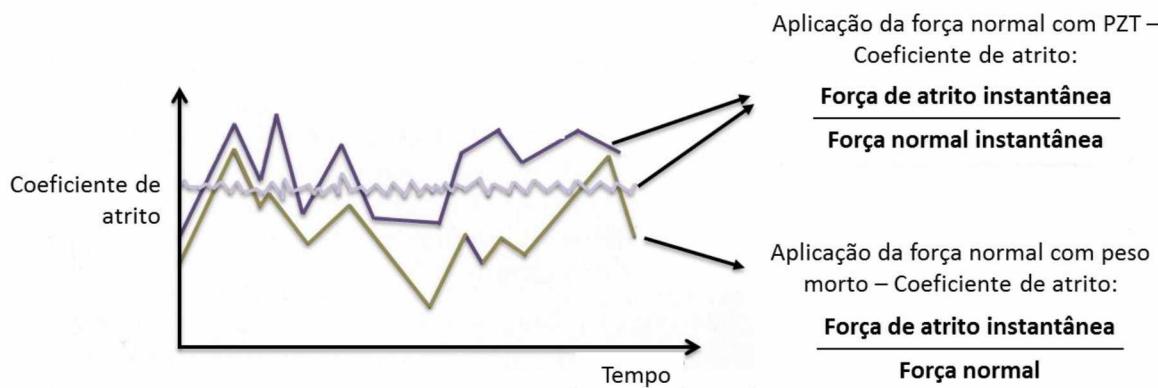


Figura 2.10. Esquema ilustrando o conceito do coeficiente de atrito. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2004).

Na maioria dos casos, a força normal de contato é aplicada por um peso morto, impondo uma tensão de contato nas superfícies deslizantes e uma força nominal (curva marrom da Fig. 2.11). Entretanto, em superfícies ásperas ou com inclinação, a carga de contato pode variar significativamente tornando a leitura do peso morto estática e incorreta visto que, em superfícies mais rugosas, o carregamento tende a oscilar mais. Ou seja, a força de atrito também será afetada pela rugosidade (STANLEY ;BOGY, 1993). A Figura 2.11 apresenta os efeitos da inclinação da superfície.

Se o substrato é inclinado com um pequeno ângulo γ (poucos graus), então, a força de atrito também apresentará inclinação relativa ao ângulo acrescida do desvio resultante W_{seny} . Consequentemente, a força de atrito medida (dependente da força horizontal medida) será diferente da força de atrito verdadeira. O nivelamento das superfícies é particularmente importante quando se medem baixos coeficientes de atrito porque pequenas inclinações podem gerar grandes erros (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2004).

Contudo, o erro total no deslocamento com movimento alternado é inferior ao do movimento contínuo, porque, para qualquer ângulo de inclinação, o desvio do atrito medido é invertido na mudança de direção do deslizamento. Isso significa que no movimento alternado a força de atrito média mensurada durante um ciclo completo de deslizamento é muito próxima ao valor real. Uma inclinação diferente de zero fará, porém, que a força de atrito num instante do movimento alternado difira da força de atrito real (HAYWARD ;FIELD, 1988).

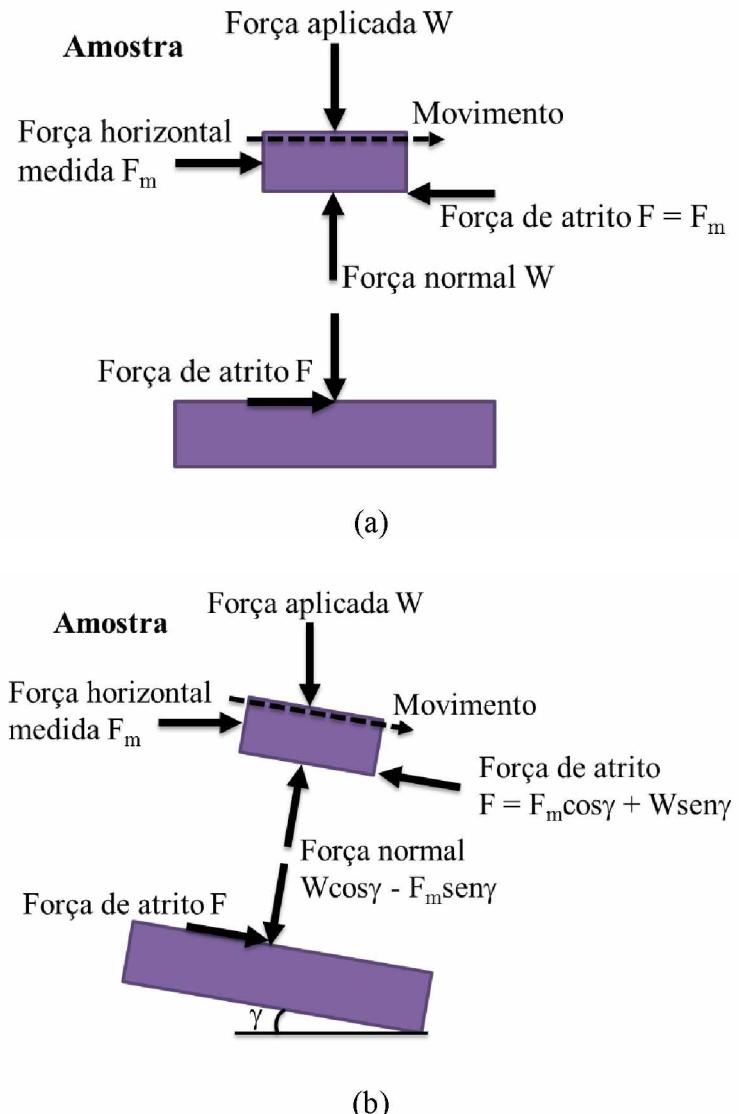


Figura 2.11. Esquema ilustrando o efeito do ângulo de inclinação da amostra sobre a força de atrito aparente. (a) Caso ideal. (b) Plano inclinado. Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (2004).

Além disso, ANTONOV; HUSSAINOVA e ADOBERG (2013) mostraram que a inércia tem efeito significativo no carregamento, sendo importante a realização do controle da força normal. Esse estudo teve como objetivo enfatizar o efeito da inércia do sistema de carregamento de um tribômetro no comportamento de desgaste de diferentes pares tribológicos. Foi verificado que o maior efeito de inércia e rigidez do sistema de carregamento sobre o coeficiente de atrito ocorreu durante o regime transitório devido à rugosidade inicial (ANTONOV; HUSSAINOVA; ADOBERG, 2011).

Devido à inércia gerada no movimento de deslizamento, a força normal real no contato é diferente da força aplicada pelo peso morto, não sendo possível controlá-la ou medi-la. Um controle do carregamento ao longo do deslizamento pode fornecer uma leitura da força normal instantânea (curvas roxas da Fig. 2.10), permitindo um carregamento dinâmico com uma aproximação mais real do coeficiente de atrito em um dado instante.

Nessa dissertação, os autores optaram por um controle através de um atuador piezelétrico (PZT) para evitar os efeitos da inércia gerada pelo peso morto e obter leituras reais da força de atrito instantânea.

Uma técnica para mensurar a força de atrito e a carga aplicada em um deslizamento com movimento alternado é dada pela leitura de uma célula de carga acoplada ao penetrador (contracorpo) do ensaio.

2.3.2 Medição do desgaste

Para medição do desgaste no ensaio por deslizamento com movimento alternado há três métodos básicos: detecção de alteração da massa, medição da redução da dimensão da amostra e uma análise do perfil topográfico do corpo de prova desgastado (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2004). Em ensaios com baixa taxa de desgaste, é difícil mensurar a variação da massa ou medição do tamanho da amostra sem a utilização de equipamentos com grande resolução, como balanças precisas e métodos óticos, voltando-se o foco para medição da topografia através da perfilometria. Nessa técnica, um projetor de ótico, um apalpador (contato mecânico), por exemplo TalySurf®, ou laser são usados para leitura da superfície da marca de desgaste e da distribuição de desgaste entre as amostras (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2004).

Na perfilometria empregada nessa dissertação, um contato mecânico foi aplicado através de um apalpador com ponta de diamante que se move com velocidade constante sobre a amostra em uma direção transversal. Os movimentos verticais da caneta geram sinais analógicos ou digitais que são registrados, gerando um perfil topográfico (WENNERBERG ;ALBREKTSSON, 2000). A Figura 2.12 ilustra esquematicamente essa técnica.

Tal técnica fornece uma imagem da marca de desgaste que é compilada através do contato mecânico sobre a marca de desgaste ao longo de seções transversais, fornecendo

informações do perfil 2D. O desgaste pode ser avaliado a partir do perfil da trilha obtido através das áreas das seções transversais medidas.

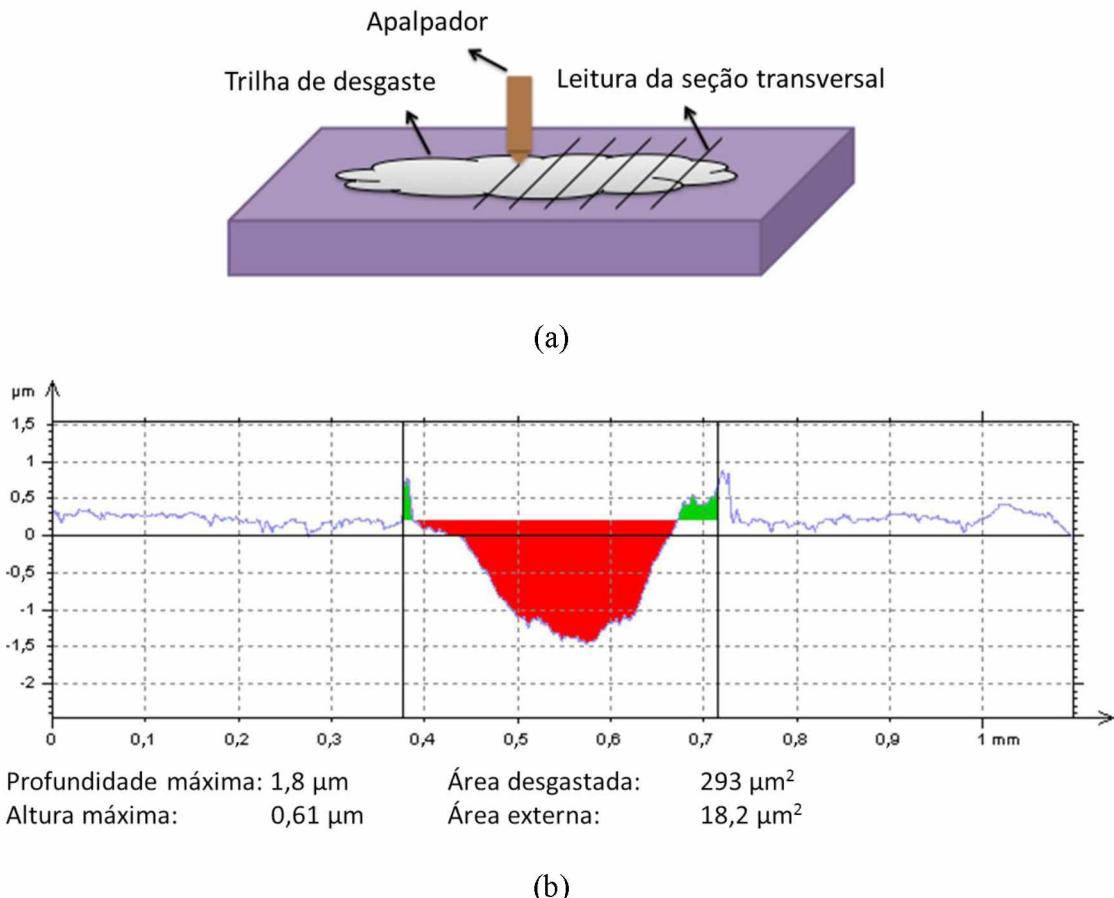


Figura 2.12. Análise do perfil topográfico da trilha de desgaste via perfilometria: (a) Método. Adaptado de WENNERBERG e ALBREKTSSON (2000). (b) Representação topográfica do perfil obtido.

2.4 TRIBOSCOPIA

BELIN e MARTIN (1992b) propuseram a técnica de triboscopia que representa as variáveis medidas durante um ensaio tribológico, através de um método de imagem numérica, considerando a complexidade dos fenômenos envolvidos. Baseia-se no acoplamento de um tribômetro a um processador de imagem numérica, com o objetivo de efetuar uma representação sintética do comportamento da superfície durante o deslizamento com movimento alternado utilizando-se dados obtidos durante o ensaio.

A técnica proposta por BELIN e MARTIN (1992b) mostrou que através de imagens de triboscopia pode-se visualizar o efeito localizado do revestimento, o que não podia ser explicado quando analisava-se a evolução dos valores médios de atrito com o tempo. Tal fato justifica-se, visto que as principais respostas do sistema tribológico, o atrito e o desgaste, não são dependentes somente da ação temporal, mas também da ação espacial.

A triboscopia é apontada como particularmente útil para analisar o comportamento tribológico de revestimentos (BELIN; LOPEZ; MARTIN, 1994; WAHL; BELIN; SINGER, 1998; FONTAINE et al., 2004). Por exemplo, a investigação do efeito de diferentes atmosferas envolventes e condições de ensaios sobre o desempenho tribológico de filmes de nitreto de carbono depositados por feixe de íons de silício foi complementada pelo uso de triboscopia (SÁNCHEZ-LÓPEZ et al., 2002).

DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015) propuseram um ajuste dos parâmetros utilizados na triboscopia para provar e registrar dados durante os ensaios, de modo que a taxa de aquisição é grande o suficiente para representar os fenômenos envolvidos no contato tribológico sem produzir arquivos excessivamente grandes. Para tal, utilizou-se um tribômetro comercial acoplado a um sensor LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) para monitorar a posição do pino-esfera dentro do comprimento de curso. O deslocamento medido pelo LVDT corresponde à posição do contracorpo dentro de cada curso e dentro da pista de desgaste. A Figura 2.13 representa o comportamento LVDT ao longo do ensaio.

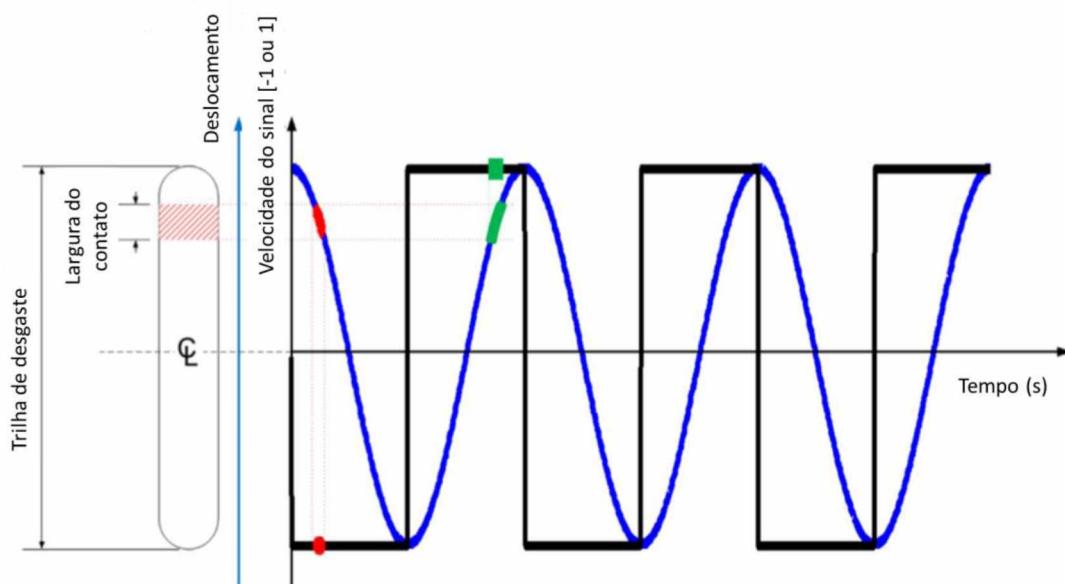


Figura 2.13. Relação entre o sinal LVDT e a posição na pista de desgaste. Adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015).

A análise dos dados amostrados, proposta por DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015), envolve a criação de uma matriz numérica $M \times N$, em que M é o número de larguras de contato dentro do comprimento do curso e N é o número de ciclos do movimento de vaivém. A Figura 2.14 ilustra o esquema da matriz utilizada.

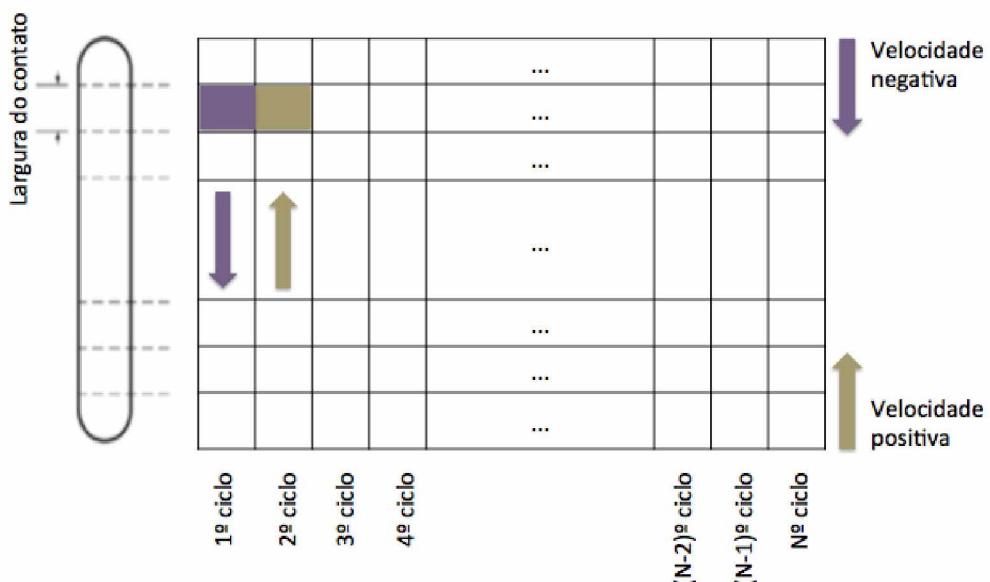


Figura 2.14. Matriz utilizada para interpretar os dados amostrados através da triboscopia. Adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015).

Através dessa matriz, um software constrói imagens coloridas numéricas dos dados adquiridos durante um ensaio tribológico, denominadas mapas triboscópicos, com resoluções espaciais e temporais superiores aos obtidos nos ensaios convencionais. Um exemplo de mapa de triboscopia é apresentado na Fig. 2.15. O mapa triboscópico fornece informações do coeficiente de atrito ao longo da distância percorrida em uma posição específica da linha de desgaste por meio do mapa de cores.

A técnica triboscópica foi desenvolvida para melhorar o significado e para facilitar a análise espacial e temporal dos fenômenos que ocorrem durante ensaios tribológicos de deslizamento com movimento alternado, tornando mais fácil a visualização de informações pertinentes através do processamento dos dados amostrados via imagem triboscópica. É particularmente útil para deslizamento com movimento alternado. O método concebido é eficaz para evitar erros de pesquisadores, como a análise de correlação errada entre vários

tipos de informações obtidas em diferentes posições de deslizamento (DOS SANTOS; COSTA;DE MELLO, 2015).

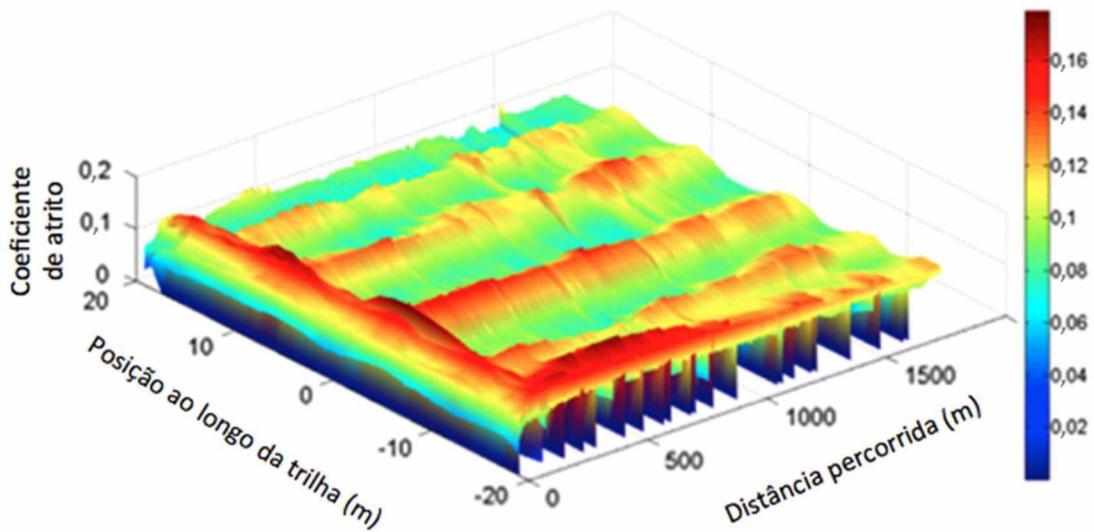


Figura 2.15. Mapa 3D típico para disco com partículas lubrificantes. Adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015).

A técnica, pouco documentada na literatura, é capaz de fornecer dados relevantes no estudo de potencialidades do desgaste por deslizamento. Ademais, o efeito da presença de lubrificantes ou de imperfeições pode também ser analisado através da triboscopia, enriquecendo a análise temporal e espacial, pouco estudada até então. As imperfeições são provenientes do processo de fabricação, de texturização, lubrificação ou de falhas no manuseio.

2.4.1 Efeitos de imperfeições na triboscopia

Trabalhos atuais apresentam uma discussão sobre o efeito de imperfeições no coeficiente de atrito e na triboscopia (PARREIRA; GALLO;COSTA, 2012; DOS SANTOS; COSTA;DE MELLO, 2015; GACHOT et al., 2017).

As marcas de retífica representam defeitos gerados no processo de fabricação. Essas marcas são identificadas em diversos sistemas mecânicos que passam por uma etapa de retificação, dentre eles: camisa de cilindro automotivo, barramentos e primas de precisão das máquinas operatrizes. Muitos desses sistemas estão sujeitos ao desgaste por deslizamento e a

presença dessas marcas são percebidas por riscos e ou sulcos paralelos com espessura e profundidade uniforme, que podem exercer a função de texturas.

A topografia gerada pela texturização superficial poder ser utilizada para alterar diferentes propriedades superficiais posto que a superfície de um material representa um local onde ocorre a maioria das interações físico-químicas. Essas modificações micro e nano-estruturais são objetivo de estudos em diversos campos da ciência com avanços, principalmente, nos campos da óptica, termodinâmica, biologia e tribologia através do melhoramento de propriedades funcionais originando as então chamadas superfícies funcionais (engineered) (BRUZZONE et al., 2008). O processo de texturização superficial pode ser entendido como a criação de modelos topográficos regulares na superfície de um material visando melhorar suas propriedades, como nos estudos de HAMILTON; WALOWIT e ALLEN (1966).

Segundo COSTA (2005), o comportamento tribológico de superfícies texturizadas pode ser melhorado por três principais efeitos. O primeiro, é o acúmulo de partículas de desgaste dentro dos bolsos que compõem a textura, evitando o desgaste abrasivo através da presença dessas partículas entre as superfícies deslizantes. O segundo, é o incremento da capacidade de retenção de lubrificante dentro do contato, em contraste com superfícies muito lisas. Por fim, o terceiro, que, devido às cunhas convergentes formadas pelos bolsos da textura, pode elevar a pressão hidrodinâmica do lubrificante.

PARREIRA; GALLO e COSTA (2012) identificaram que amostras com superfícies texturizadas diminuíram o coeficiente de atrito médio quando comparadas às amostras sem texturas. A triboscopia permitiu uma boa visualização do coeficiente de atrito em função do número de ciclos e da posição em cada ciclo (DOS SANTOS; COSTA;DE MELLO, 2015).

DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015) mostraram que a presença de lubrificantes sólidos em amostras de bronze não foram perceptíveis numa análise temporal, mas significativas na análise espacial, ressaltando um benefício da triboscopia. Os mapas de triboscopia nos ensaios em discos de bronze contendo inserções de grafite regularmente espaçadas apresentaram variação no coeficiente de atrito nas posições correspondentes a presença de lubrificante em cada ciclo. Nos instantes iniciais do ensaio a presença de defeitos gerou uma diminuição sistemática no valor do coeficiente de atrito nessas posições devido à perda de contato provocada pelo defeito.

HORNG; LIN e LEE (1994) analisaram a influência de irregularidades superficiais no atrito e no desgaste de rolamentos de rolos sob regime de lubrificação elastohidrodinâmico

através de ensaios de rolamento e deslizamento. Notou-se que o coeficiente de atrito e o desgaste foram reduzidos quando os padrões de textura foram orientados paralelamente à direção de deslizamento. Justifica-se com base no fato da textura funcionar como reservatórios de lubrificante. COSTA e HUTCHINGS (2006) confirmaram esses resultados através de análises do coeficiente de atrito em ensaios lubrificados utilizando texturas com sulcos paralelos e perpendiculares à direção de deslizamento.

Todavia, com a baixa exploração acadêmica no estudo de triboscopia, não há dados na literatura apropriados para dimensionar a capacidade da técnica em identificar a presença de qualquer tipo de defeito independente da sua origem e tamanho.

2.5 OBJETIVOS

O objetivo dessa dissertação é desenvolver um microtribômetro capaz de realizar deslizamento com movimento alternado entre duas superfícies, sendo possível capturar imagens desse processo. A metodologia proposta consiste em avaliar a capacidade operacional do equipamento e validá-lo através da comparação do coeficiente de atrito e do volume desgastados em condições similares ao de um equipamento comercial. A análise óptica pode ser utilizada para comparar esses fenômenos, além da técnica triboscopia. Uma vez validado, a triboscopia e a captura de imagens poderão ser utilizadas para estudos de potencialidade do método desenvolvido, como, por exemplo, o efeito de imperfeições em ensaios de desgaste com movimento alternado.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta o procedimento experimental adotado nessa dissertação. O esquema das atividades desenvolvidas está mostrado na Fig. 3.1.

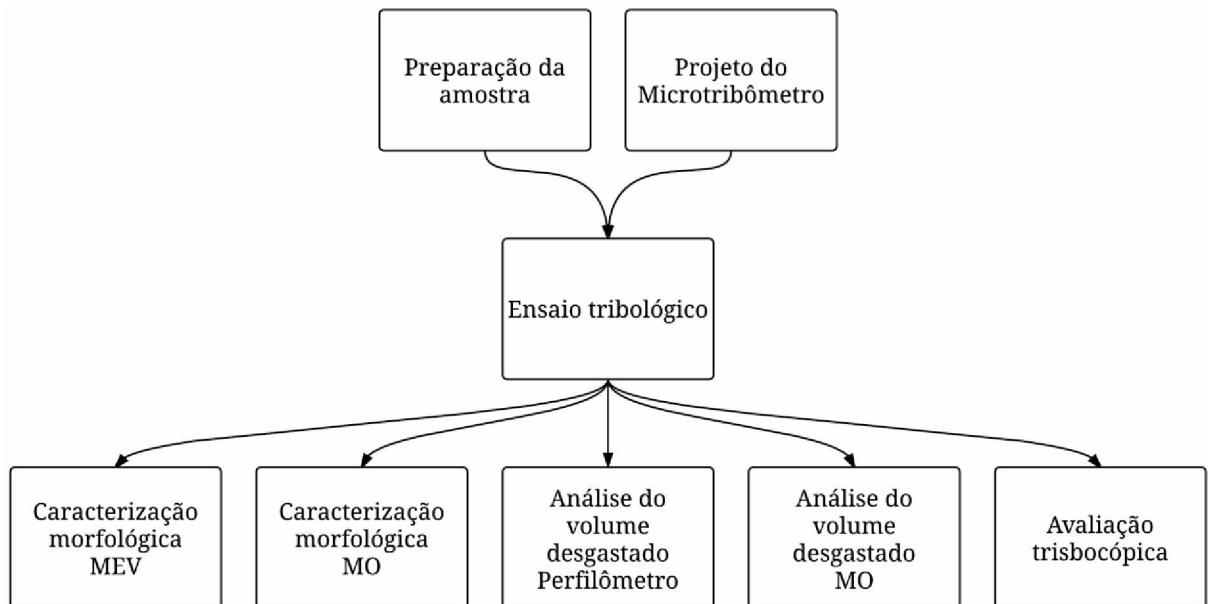


Figura 3.1. Etapas desenvolvidas nessa dissertação.

O projeto do equipamento microtribômetro foi executado paralelamente à etapa de preparação das amostras.

Os ensaios de deslizamento a seco com movimento alternado foram realizados com o intuito de validar o equipamento e metodologia desenvolvidas. As análises via microscopia, perfilometria e triboscopia (histórico do atrito) foram realizadas para caracterizar os fenômenos tribológicos envolvidos no processo de desgaste.

Para identificar as potencialidades dessa nova metodologia, foram realizados ensaios com a aquisição de imagens da trilha de desgaste ao longo do ensaio. Essa abordagem permite a observação da evolução de fenômenos associados.

3.1 MATERIAIS – PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

O material do corpo de prova utilizado nesse trabalho é de um aço VC 10, cuja composição química está apresentada na Tab. 3.1. Essa composição foi medida através da técnica de Espectrometria de Emissão Ótica (equipamento ThermoARL-4460) (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).

Tabela 3.1. Composição química da amostra VC10 (porcentagem em peso) (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).

Componentes	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	P	S
Min	0,76	0,1	0,5	4,3		0,11				
Max	1,05	0,45	0,8	4,7	0,35	0,39	0,15	0,1	0,025	0,025

As amostras foram usinadas em blocos de 35 mm x 35 mm x 5 mm, tratadas termicamente e retificadas. O tratamento térmico de têmpera foi executado com solubilização a 950 °C por duas horas seguido de resfriamento em caixa de areia. A microestrutura resultante desse tratamento é a martensita, como apresentado na Fig. 3.2.

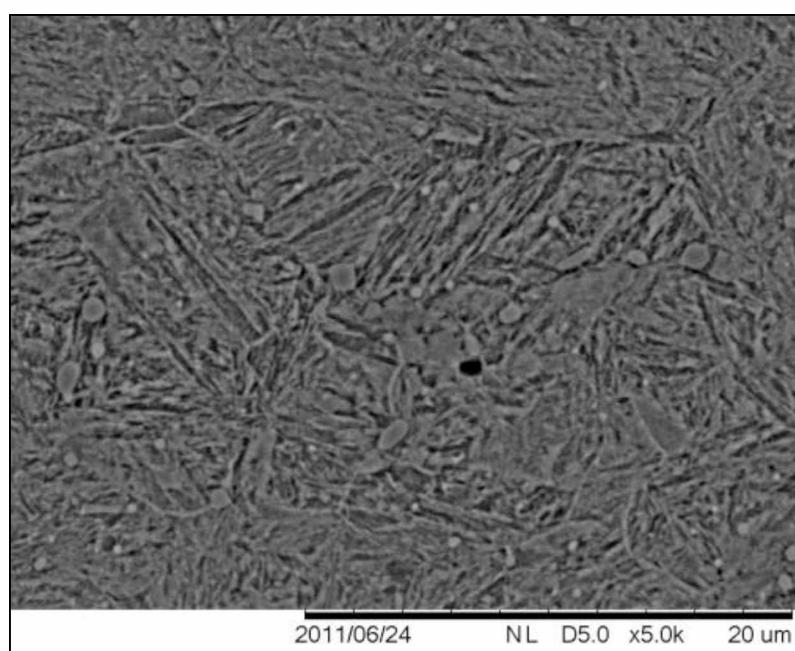


Figura 3.2. Microestrutura do corpo de prova antes do revestimento (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).

As amostras foram retificadas para garantir o nivelamento das amostras, que contribuiu para um controle mais eficiente da força normal durante os ensaios de desgaste. As amostras também foram revestidas com uma camada de Níquel Químico (GONÇALVES JÚNIOR, 2016). A microdureza do revestimento foi acessada através de seções transversais da amostra utilizando um microdurômetro Shimadzu com massa de 100 g e penetrador Vickers. O valor de microdureza obtido foi $827 \pm 87 \text{ kgf/mm}^2$.

A espessura da camada foi medida na seção transversal utilizando microscopia óptica (microscópio Olympus BX51N). A espessura da camada de Níquel Químico é de aproximadamente 13 μm (GONÇALVES JÚNIOR, 2016). A Figura 3.3 apresenta uma seção transversal desse revestimento.

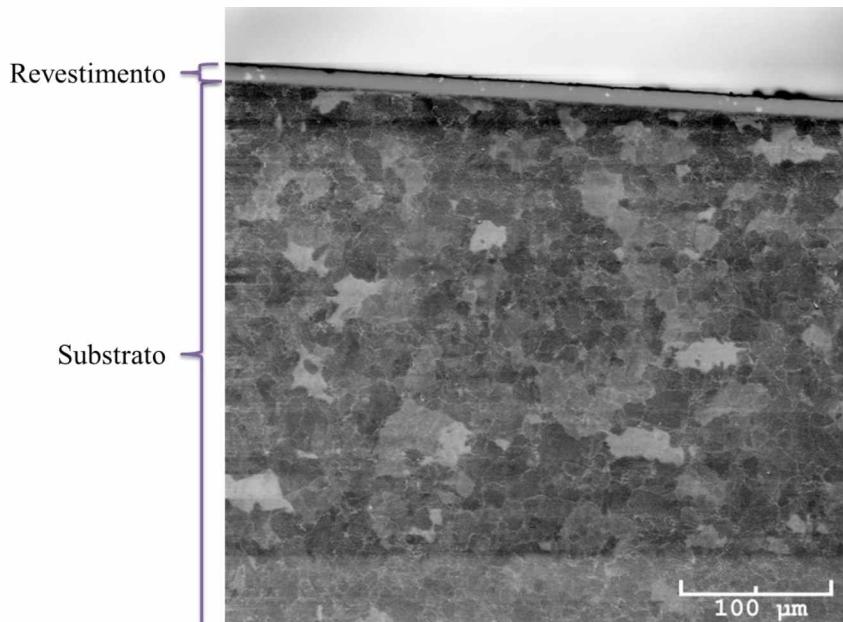


Figura 3.3. Revestimento NiP da amostra retificada (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).

Nos ensaios de desgaste foram utilizadas esferas de aço SAE 52100 com diâmetro de 5 mm como contracorpo.

A escolha da amostra de aço VC10 justifica-se, já que, devido ao seu alto valor de dureza ($827 \pm 87 \text{ kgf/mm}^2$), apresenta baixo coeficiente de atrito no ensaio de desgaste por deslizamento contra o aço SAE 52100. Esse comportamento de baixo atrito dos materiais selecionados foi importante nesse ensaio dado que o novo microtribômetro possui limitações de força tangencial. Pré-testes foram realizados em outros materiais como cobre, alumínio, ferro fundido cinzento, aço ferramenta, não obtendo êxito na limitação da força tangencial.

3.2 MICROTRIBÔMETRO

A Figura 3.4 detalha as etapas de desenvolvimento do projeto do equipamento microtribômetro.

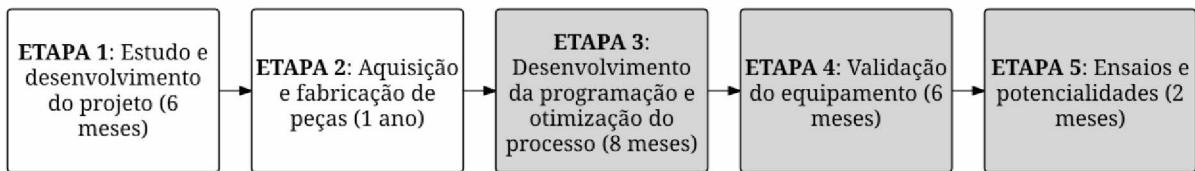


Figura 3.4. Etapas do projeto microtribômetro.

Esse equipamento foi financiado por um projeto FAPEMIG (UNIVERSAL TEC - APQ-02088-12) e contou com a participação de dois alunos de iniciação científica que trabalharam, principalmente, nas etapas 1 e 2 (cor branca). As etapas cinzas correspondem às etapas desenvolvida pela autora. A etapa 3 refere-se à criação do programa de controle funcional do equipamento, calibração dos instrumentos e otimização do programa de acordo com o processo estudado. A validação da metodologia foi realizada na etapa 4 através da comparação de resultados com outros tribômetros. Na etapa 5, foram executados ensaios específicos para evidenciar as potencialidades dessa nova metodologia. Para exemplificar o exposto, esse novo equipamento está apresentado na Fig. 3.5.

O equipamento microtribômetro é composto por três mesas coordenadoras que permitem a movimentação da amostra no plano horizontal e a movimentação do penetrador na direção perpendicular ao plano da superfície da amostra. As mesas coordenadoras são gerenciadas através de um dispositivo controlador que se comunica com o computador através de uma interface de barramento de propósito geral (GPIB padrão ANSI/IEEE 488.2). Junto com a mesa z, está associado um sistema de translação piezelétrico (PZT) que permite a movimentação unidirecional do penetrador por um percurso de 28 µm com resolução de 5 nm. O controle do sistema piezelétrico é analógico e a comunicação entre o PZT e o computador é realizada via interface analógica-digital (AD/DA).

O pórtico do equipamento, apresentado na Fig. 3.5, foi projetado para que sua dimensão e estrutura biapoiada respondesse às solicitações operacionais com deformações menores que 20 nm na direção do eixo do penetrador. A base está apoiada sobre pés de borracha para amortecimento de vibrações e excitações externas.

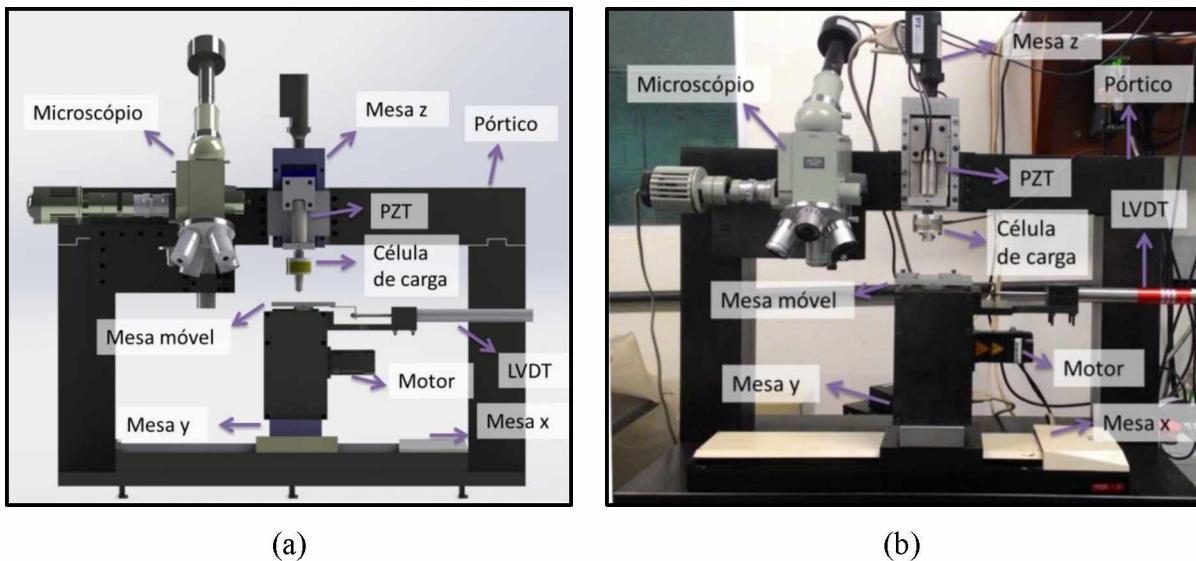


Figura 3.5. Microtribômetro. (a) Esquema e principais instrumentos. (b) Equipamento.

Uma célula de carga é responsável por adquirir as forças nas três dimensões. Esse instrumento é analógico com fundo de escala de 120 N na direção z e 40 N nas direções x e y e se comunica com o computador através de uma placa de comunicação analógica-digital. Através desse instrumento, a força de atrito, ou seja, a força tangencial na direção do movimento relativo, e a força normal são adquiridas. Esses dois elementos são utilizados no cálculo do coeficiente de atrito através da relação de Culomb. Durante o ensaio, a célula de carga opera em conjunto com o atuador piezelétrico para controlar a força normal.

Nesse trabalho, foi utilizado um penetrador padrão Brinell com diâmetro de 5 mm, apresentado na Fig. 3.6.



Figura 3.6. Penetrador padrão Brinell 5,0 mm.

Esse penetrador é conectado à célula de carga e tem uma estrutura rosqueada que assegura a fixação da esfera. Essa característica é importante, pois a esfera não pode

apresentar rotação ao longo do ensaio devido à ação da força de atrito. É possível encaixar vários tipos de penetradores, como Brinell, de diâmetros diferentes (2,5, 5 ou 10 mm), Vickers e Rockwell.

Acoplado à mesa móvel, o LVDT apresenta resolução de 100 µm com a saída dada em volts (V) numa escala de 0 a 10 V, permitindo registrar o posicionamento da amostra ao longo do carregamento, conforme apresentado na Fig. 3.7. O sinal analógico do LVDT é adquirido através de uma placa AD/DA a uma taxa de aquisição de 4 kHz.

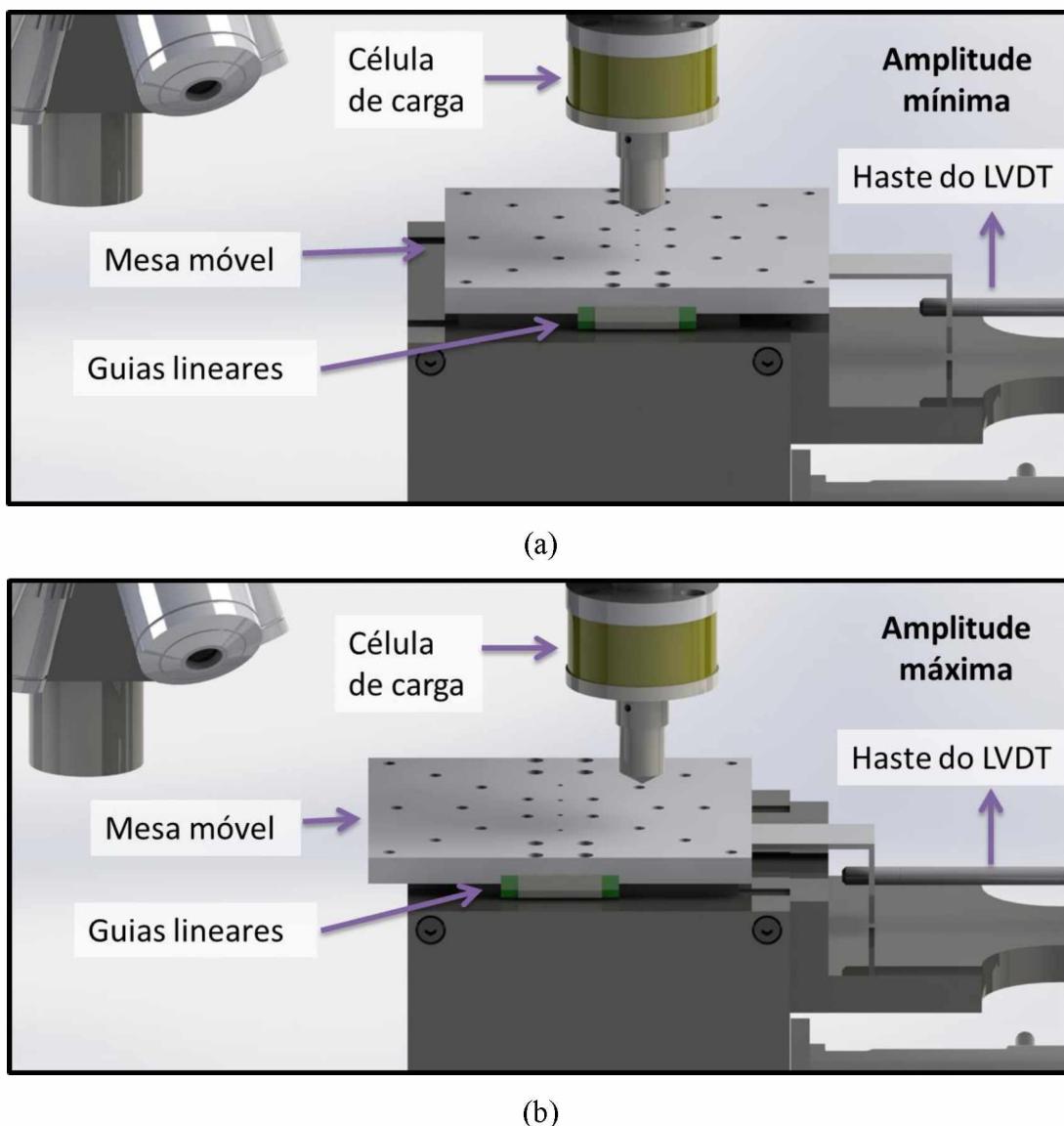


Figura 3.7. Posicionamento da mesa móvel nas extremidades do movimento alternado. (a) Amplitude mínima. (b) Amplitude máxima.

A amplitude, ou comprimento, da trilha de desgaste pode ser ajustada através da posição do pino excêntrico que é montado no sistema de guias lineares, Fig. 3.8. O disco é uma peça cilíndrica na qual uma das faces planas possui um furo centralizado para encaixe do eixo motor e a outra face possui furos excêntricos rosqueados que permitem o encaixe do pino excêntrico ao rolamento de esferas conectado às guias lineares. Por exemplo, os furos apresentam excentricidade igual a 5 e 10 mm, que correspondem a trilhas de desgaste com amplitudes de 10 e 20 mm, respectivamente.

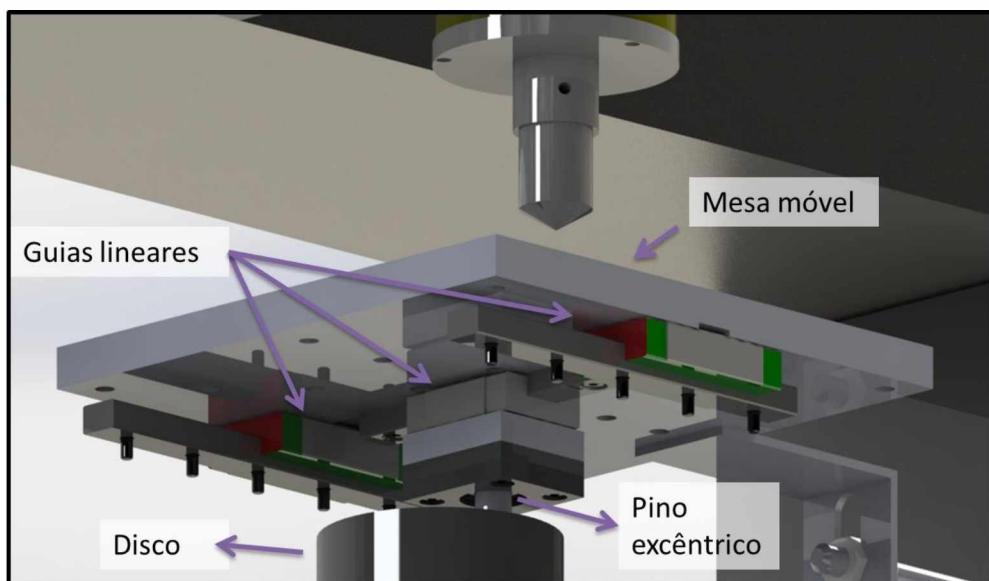


Figura 3.8. Guias lineares e disco que determina a posição do pino excêntrico.

A Figura 3.8 apresenta a montagem do mecanismo que permite a transformação do movimento de rotação do eixo motor em um movimento de translação alternado da mesa móvel. O motor e o sistema de redução controlam a rotação do eixo motor e, consequentemente, a frequência do movimento alternado. Essa montagem é feita com três guias lineares de precisão e um rolamento montado junto ao pino excêntrico. Exemplificando, para uma velocidade de 3200 rpm do motor, o redutor altera a rotação para 120 rpm no eixo motor que corresponde ao movimento alternado da mesa móvel com frequência de 2 Hz. Isto é, o redutor (tipo coroa e parafuso sem-fim) opera com uma redução de 1 para 30. A velocidade linear máxima no centro da marca de desgaste depende do comprimento da trilha de desgaste que é dado pela posição do pino excêntrico e da frequência. Por exemplo, para a montagem referente à trilha de desgaste de 10 mm (pino excêntrico à 5 mm) e frequência 2 Hz, a velocidade máxima ao longo na posição central da trilha é $0,04 \text{ m.s}^{-1}$. O motor é da

marca AKM Kollmorgen® e seu controle de rotação é feito através do sistema Compact-Rio da National Instruments® com um módulo NI9514 acoplado.

O microscópio óptico adaptado ao equipamento contém lentes objetivas com ampliação de cinco a cinquenta vezes que correspondem a uma faixa de ampliação de cinquenta até quinhentas vezes. As imagens são adquiridas através de uma câmera digital USB. O movimento das mesas x e y permitem o deslocamento da amostra da posição de ensaio até a posição do microscópio, conforme apresentado na Fig. 3.9. Essa movimentação garante a aquisição de imagens da trilha de desgaste antes ou após o ensaio ou em intervalos regulares durante o mesmo. A altura do microscópio pode ser ajustada através de um parafuso de aperto, assegurando o foco das imagens obtidas independentemente da altura da amostra. O microscópio também pode ser utilizado para posicionar a amostra de acordo com as características da superfície do corpo, por exemplo: superfícies texturizadas ou superfícies com lubrificante sólido em posições específicas, possibilitando a realização de ensaios em posições de interesse e direção específica.

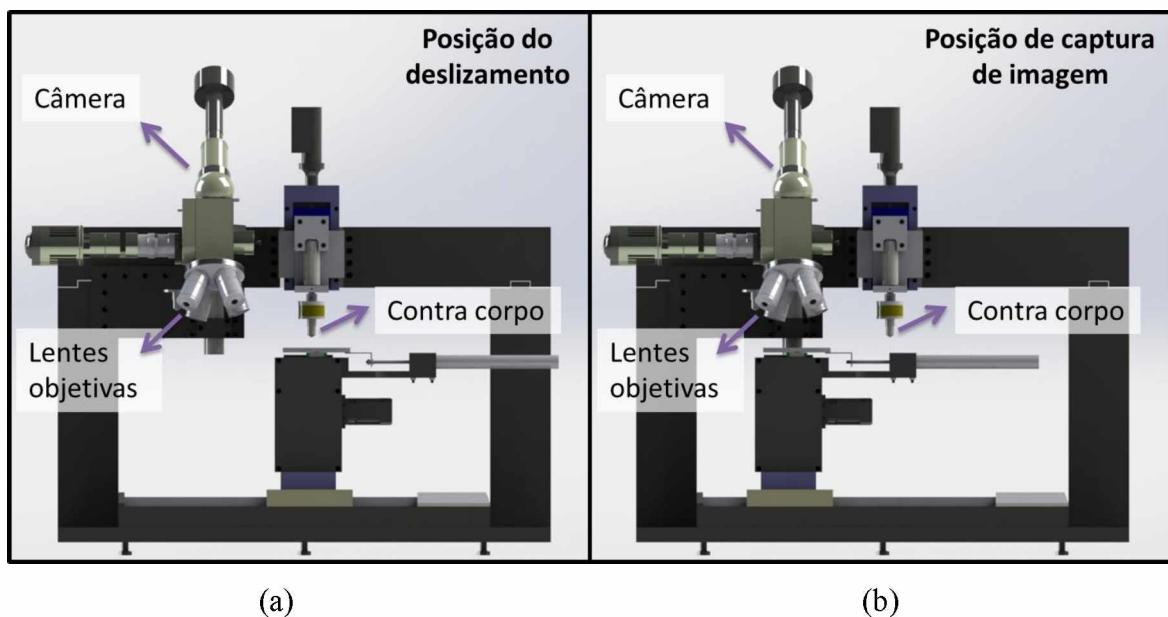


Figura 3.9. Posicionamento do porta amostra. (a) Durante o ensaio de deslizamento, (b) Durante a aquisição da imagem.

A Tabela 3.2 apresenta os instrumentos e componentes do equipamento microtribômetro, suas principais características, fabricante, modelo e interface. A programação lógica do microtribômetro para controlar a movimentação do porta amostra e o carregamento foi desenvolvido com o auxílio da plataforma LabVIEW® 2013.

Tabela 3.2. Componentes do microtribômetro.

Componentes	Resolução	Fabricante	Modelo	Interface
Mesa x	0,0001 mm	Physik Instrumente	M-535.22	
Mesa y	0,0001 mm	Physik Instrumente	M-150.11	
Mesa z	0,0001 mm	Physik Instrumente	M-150.11	
Controlador das mesas		Physik Instrumente	C804	Digital GPIB
Transladador Piezelétrico (PZT)	5 nm 28 µm (FE)	Physik Instrumente	P-239.40	
Controlador do PZT		Physik Instrumente	P267 – amplificador de 0-10 V para 0-1000 V	Analógica AD/DA
LVDT	100 µm	Metrolog	DCTH-1000C	Analógica AD/DA
Célula de carga	0,002 N 120 N (FE)	ATI – Industrial Automation	Nano 43 F/T sensor	Analógica AD/DA

3.2.1 Calibração dos instrumentos

A calibração da célula de carga foi realizada através de um programa que apresenta o sinal das forças x, y e z adquiridas por 10 s e calcula a média e desvio padrão desse sinal. A Figura 3.10 apresenta a curva de calibração da célula de carga obtida através do programa desenvolvido. O desvio padrão é tão pequeno que não é perceptível no gráfico.

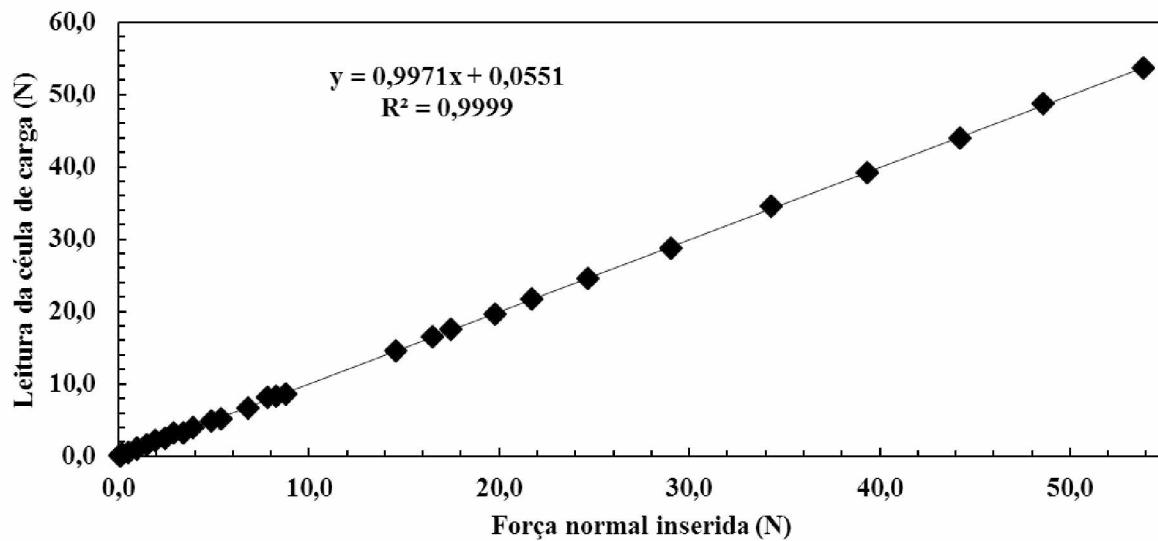


Figura 3.10. Curva de calibração da célula de carga.

A calibração do LVDT foi realizada através de leituras do sinal de tensão obtidas em diferentes posições ao longo da trilha de desgaste. Nesse caso, utilizou-se um relógio comparador para medição da posição real da trilha de desgaste e a respectiva tensão fornecida pelo LVDT. Esses valores estão apresentados na Fig. 3.11 que mostra a resposta linear do instrumento.

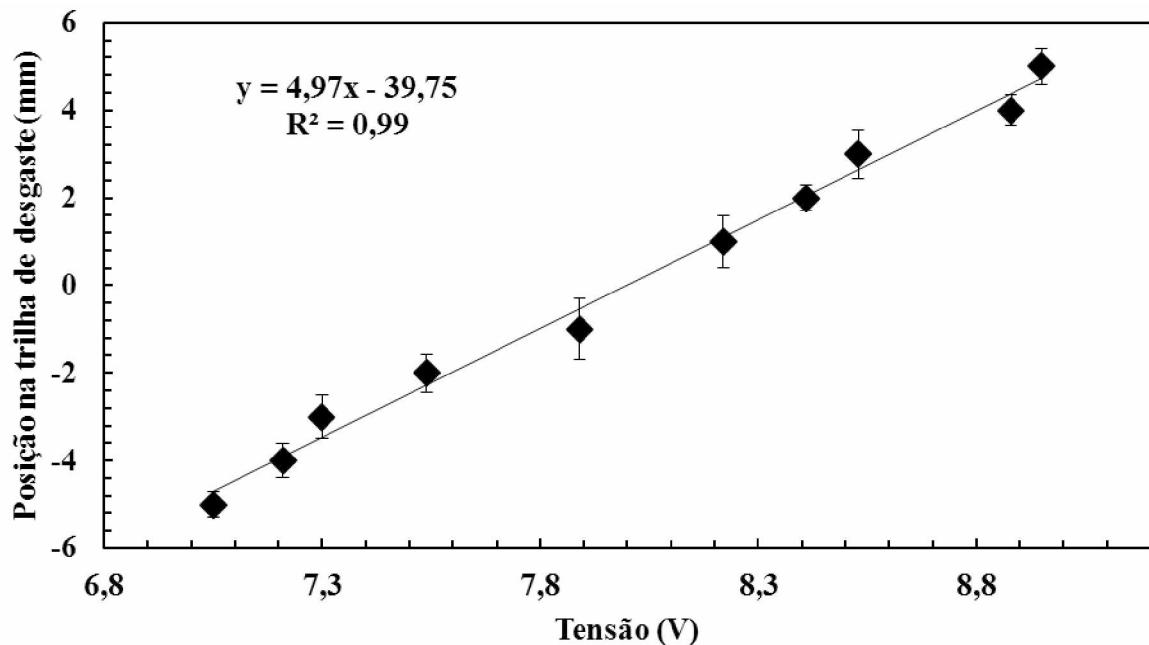


Figura 3.11. Curva de calibração do LVDT para uma trilha de 10 mm.

3.2.2 Nivelamento da amostra

Foi desenvolvido um programa específico para verificar o nivelamento da amostra na direção do deslizamento com o intuito de melhorar o controle da força normal uma vez que o PZT apresenta uma faixa de atuação restrita ($28 \mu\text{m}$).

Esse programa executa uma identação de 3 N armazenando o valor da posição do PZT (h_1). Há um deslocamento da mesa x , equivalente a 1 mm, e efetua-se nova identação de 3 N, comparando o valor da posição do PZT (h_2) com o encontrado anteriormente. A diferença destes valores ($h_2 - h_1$) é dada por Δh (μm). Esse método está ilustrado na Fig. 3.12. Portanto, tem-se a inclinação da superfície da amostra em $\mu\text{m}/\text{mm}$, que pode ser ajustada controlando o torque dos parafusos que prendem a amostra no porta amostra.

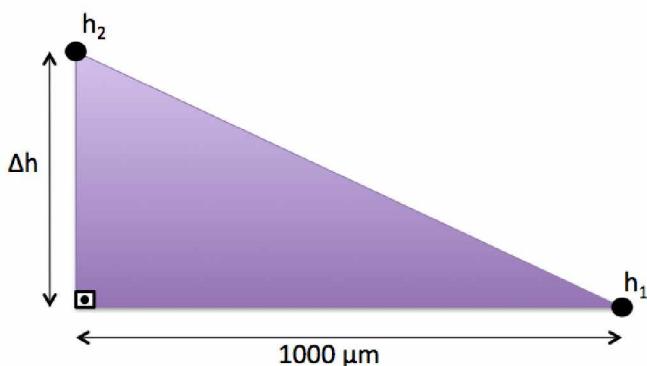


Figura 3.12. Definição da inclinação da superfície da amostra.

3.2.3 Faixa operacional da força normal

Com o objetivo de identificar a faixa operacional do equipamento para aplicação da força normal de maneira que o equipamento não apresentasse deformações significativas ao longo do ensaio, foram comparadas as impressões de dureza efetuadas no microtribômetro com as realizadas no Microduruômetro (marca: Shimadzu; modelo: HMV Micro Hardness Tester). Nessa comparação utilizou-se uma amostra de aço ABNT 1020 com superfície lixada e polida metalográficamente.

Avaliou-se a diagonal de impressão média de cada ensaio através do microscópio óptico Olympus BX51M, como mostrado na Fig. 3.13.

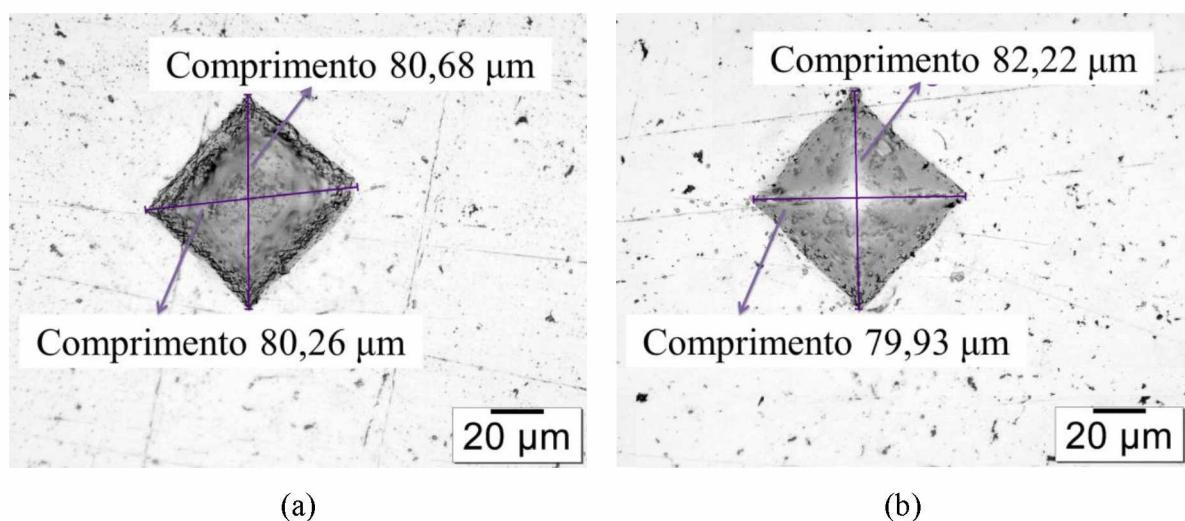


Figura 3.13. Exemplo de medição da diagonal da indentação realizada com força normal 4,903 N e comparação entre equipamentos. (a) Microtribômetro. (b) Microduruômetro.

Foram aplicadas diferentes cargas variando entre 0,10 N a 19,61 N. Nessa comparação foram realizadas três repetições para cada carga de identação em cada equipamento com duração de impressão de trinta segundos em cada impressão. Para cada ensaio realizado, mediu-se duas diagonais através do software Olympus Stream Micro-imaging®.

3.3 ENSAIO POR DESLIZAMENTO COM MOVIMENTO ALTERNADO

3.3.1 Validação da metodologia proposta

Para validar as informações encontradas no ensaio de desgaste realizado no microtribômetro desenvolvido, foram realizadas comparações com informações obtidas nos ensaios de desgaste efetuados em um tribômetro comercial, (marca: Plint and Partners LDT, modelo: TE 67), Fig. 3.14. Em ambos tribômetros foram utilizados os mesmos parâmetros e a mesma amostra, com o intuito de se obter respostas parecidas em termos de taxa de desgaste, mecanismo de desgaste e forças de reação ao movimento (atrito).

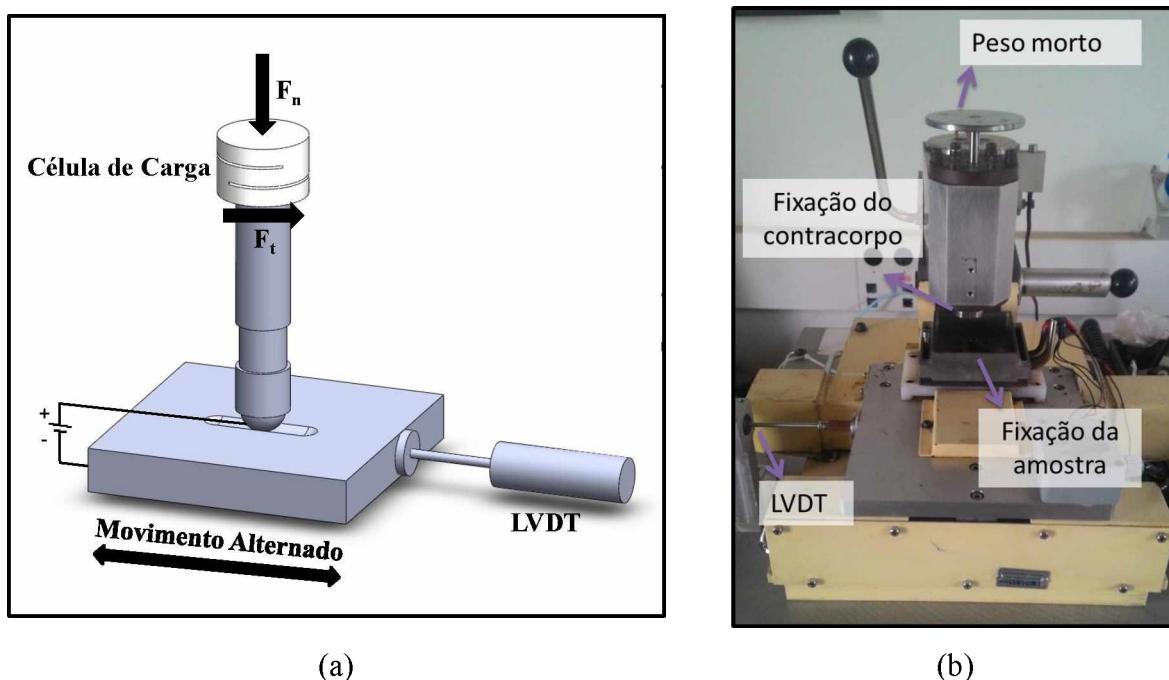


Figura 3.14. Tribômetro Universal Plint TE 67®. (a) Modelo esquemático do ensaio tribológico. Adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015). (b) Equipamento.

O tribômetro comercial também possui um sensor LVDT montado junto ao suporte da amostra para a medição da posição dela em relação ao contracorpo com alta taxa de aquisição (8192 Hz).

O fluxograma do processo de validação está apresentado na Fig. 3.15. Definida a amostra e os parâmetros, ensaios foram realizados no tribômetro comercial e no microtribômetro desenvolvido, cujo objetivo é analisar a topografia e os mecanismos de degaste verificando se há similitude entre os resultados. De acordo com esse esquema, concretizada essa similitude, o novo microtribômetro e a metodologia proposta foram validados.

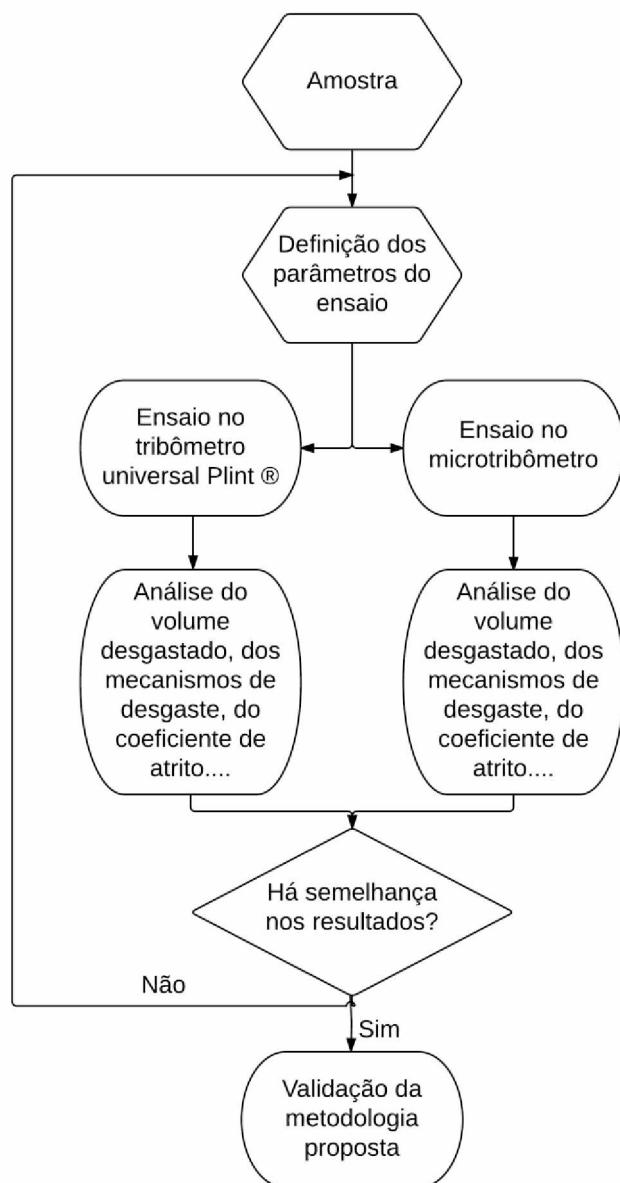


Figura 3.15. Fluxograma do processo de validação da metodologia proposta.

As informações obtidas no ensaio comercial foram armazenadas e tratadas em um microcomputador utilizando a plataforma LabVIEW®. A análise da evolução das informações obtidas é feita através da técnica triboscopia, que representa a variação dos parâmetros físicos em relação ao tempo durante o ensaio de desgaste através de um gráfico tridimensional (DOS SANTOS; COSTA;DE MELLO, 2015). Os mapas de triboscopia foram desenvolvidos utilizando o software MATLAB®.

Além disso, foram realizados cinco ensaios em cada equipamento e eles foram identificados como apresentado na Tab. 3.3.

Tabela 3.3. Ensaios de validação.

	Microtribômetro	Tribômetro Plint
Ensaios	Nomenclatura	Nomenclatura
1	M1	P1
2	M2	P2
3	M3	P3
4	M4	P4
5	M5	P5

Foi definido os mesmos parâmetros de ensaio em ambos os equipamentos, como apresentados na Tab. 3.4. Os parâmetros velocidade, aceleração do motor, números de ciclo do processo e força de parada não contemplam os ensaios do tribômetro comercial. Ressalta-se que os ensaios foram realizados com força normal e velocidade constantes.

Tabela 3.4. Parâmetros do ensaios experimentais.

Parâmetros		
	Microtribômetro	Plint
Frequência	2 Hz	2 Hz
Comprimento da marca de desgaste	10 mm	10 mm
Velocidade do motor	3600 rpm	-
Aceleração do motor	600 rpm	-
Etapas	1	-
Duração do ensaio	3600 s	3600 s
Força normal imposta	9,81 N	9,81 N
Controle da força normal	Atuador piezelétrico	Peso morto

O tempo do experimento foi definido nos primeiros ensaios de acordo com o coeficiente de atrito, para garantir o regime permanente de desgaste, permitindo análises de taxa e mecanismos de desgaste nos dois sistemas. O regime permanente foi considerado como o regime onde há estabilização do coeficiente de atrito.

3.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

A identificação dos padrões morfológicos associados aos mecanismos de desgaste presentes na trilha de desgaste e no contracorpo após o ensaio foi realizada via microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia óptica (MO).

O MEV utilizado é do fabricante Hitachi, Modelo TM 3000 e o software TM 3000 Tabletop Microscope®. A análise de espectroscopia dispersiva de raios X (EDX) foi feita com sistema Hitachi SwiftED3000 e o software SwiftED versão 1.7 da Oxford Instruments Analytical Limited®. Essa análise tem por objetivo identificar os possíveis elementos químicos presentes na formação de tribocamada. Nesse caso, adotou-se a intensidade do feixe de elétrons em 15 kV. O microscópio óptico utilizado é do fabricante Olympus, modelo BX51M, como complemento da avaliação dos mecanismos de desgaste presentes nas amostras e no contracorpo após o ensaio e demais medições. As imagens de microscopia óptica ao longo da trilha de desgaste foram obtidas com o auxílio do software Olympus Stream Micro-imaging com ampliações variando entre 50x e 1000x.

3.5 ANÁLISE DO VOLUME DESGASTADO

A topografia da marca de desgaste foi acessada através do perfilômetro Form Talysurf Intra 2, da Taylor Hobson. Esse equipamento possui uma resolução de medição em z de 0,016 µm, que permite a obtenção de seções transversais da marca de desgaste com alta precisão.

Para cada ensaio foram obtidas a topografia de dez seções transversais ao longo da trilha de desgaste. A área da seção transversal relativa à marca de desgaste foi medida com o auxílio do software Digital Surf MountainsMap Universal 3.0.11®, como apresentado na Fig. 3.16. O volume desgastado da trilha de desgaste pode ser estimado através da razão da área por distância percorrida (10 mm), obtendo-se um valor médio e desvio padrão para 10 medições.

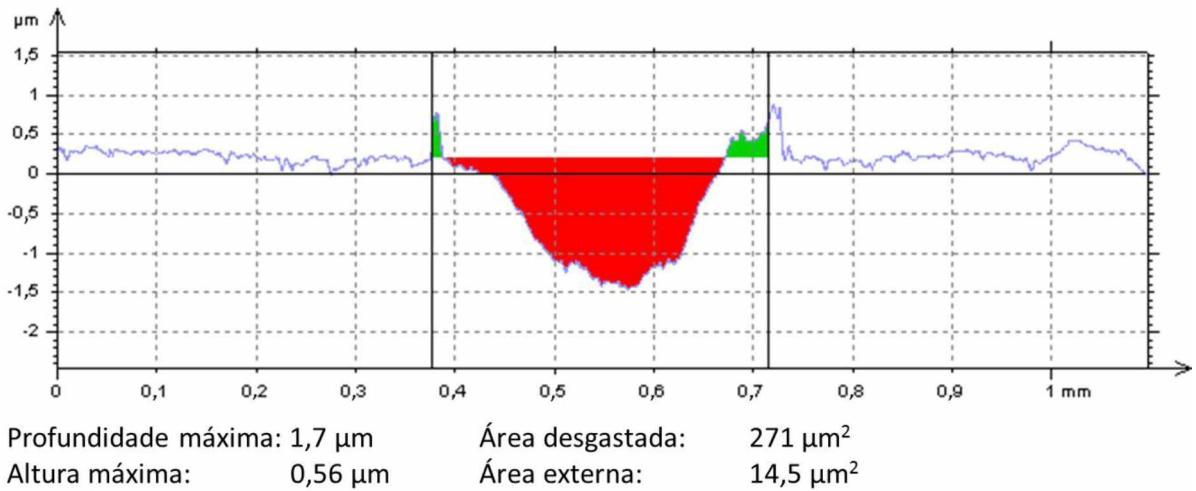


Figura 3.16. Medição da área desgastada da seção transversal da trilha de desgaste.

3.6 ANÁLISE DO VOLUME DESGASTADO DO CONTRACORPO – MO

O desgaste do contracorpo esférico pode ser aproximado pelo volume de uma calota esférica que pode ser quantificado como descrito pela norma ASTM n° G99-05 ano 2010 (ASTM, 2010). Nesse caso, foram medidas dez diagonais do diâmetro cordal da calota esférica produzida no contracorpo de cada ensaio. O volume desgastado da calota esférica foi calculado através das equações 3.1 e 3.2 e do método apresentado na Fig. 3.17.

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$V = \frac{\pi h}{6} \left(3 \frac{d^2}{4} + h^2 \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde h representa a altura e r o raio da calota esférica desgastada, d é a diagonal da esfera e V é o volume total desgastado da esfera.

A diagonal da calota foi registrada e medida utilizando o software Olympus Stream Micro-imaging®. Dessa forma, foi obtido o volume desgastado médio da calota esférica e desvio padrão referente a cada ensaio.

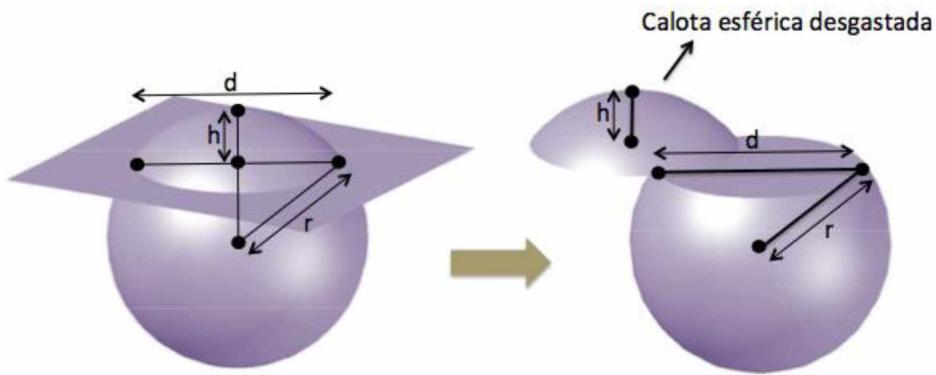


Figura 3.17. Representação da calota esférica desgastada no contracorpo.

3.7 TRIBOSCOPIA

Com o auxílio do software MATLAB[®], implementou-se um programa (adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015)) para o desenvolvimento dos mapas de triboscopia. Esse algoritmo recebe a aquisição de dados feita pelo microtribômetro em um arquivo no formato “.txt” e, a partir desses dados, gera uma representação tridimensional do coeficiente de atrito ao longo da posição da trilha de desgaste e números de ciclos do ensaio.

O mapa de triboscopia é gerado considerando que um ciclo representa a ida e a volta da mesa móvel em relação ao ponto inicial, como ilustrado na Fig. 3.18.

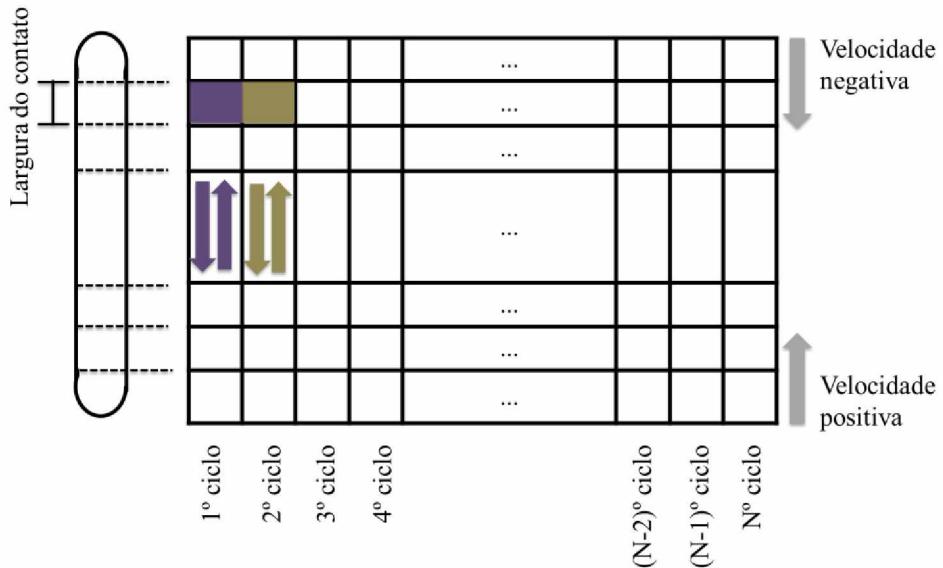


Figura 3.18. Matriz utilizada para interpretar os dados amostrados do ensaio através da triboscopia. Adaptado de DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015).

Cada elemento da matriz apresentada na Fig. 3.18 representa a média de dois valores do coeficiente de atrito para a mesma largura do contato. Dessa maneira, cada valor do gráfico representa a média da medição de atrito realizada na ida e na volta para uma dada posição.

A Figura 3.19 apresenta um exemplo de mapa de triboscopia gerado no algoritmo desenvolvido para um ensaio realizado no equipamento microtribômetro.

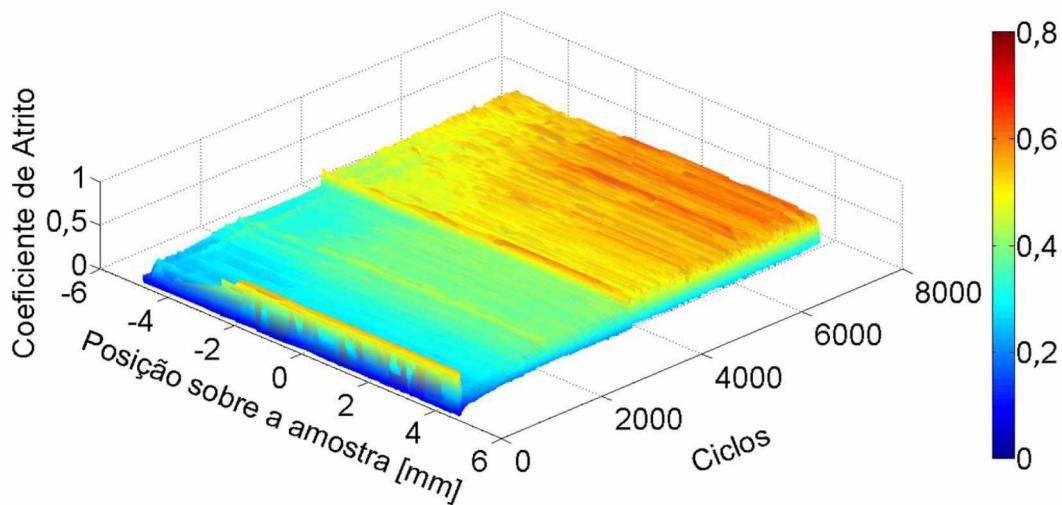


Figura 3.19. Mapa de triboscopia de um ensaio realizado no equipamento microtribômetro.

A partir da mesma matriz de pontos, também podem ser obtidas as curvas do atrito médio e da força normal média ao longo do número de ciclos, bem como os valores do atrito médio total e do atrito médio em regime permanente, como apresentado na Fig. 3.20.

3.8 POTENCIALIDADE DO MÉTODO DESENVOLVIDO

Um estudo sobre potencialidades do método desenvolvido foi realizado com o intuito de reforçar a capacidade do microtribômetro construído.

3.8.1 Efeito de imperfeições e captura de imagens

Entre as potencialidades do novo microtribômetro, apresenta-se a possibilidade de capturar imagens em intervalos específicos durante o ensaio, acompanhando a evolução da

trilha de desgaste em uma posição específica. Para isso, foi realizado um ensaio de acordo com os parâmetros descritos na Tab. 3.5, utilizando a amostra de aço VC10 e contracorpo de aço 52100, os mesmos materiais utilizados nos ensaios de validação.

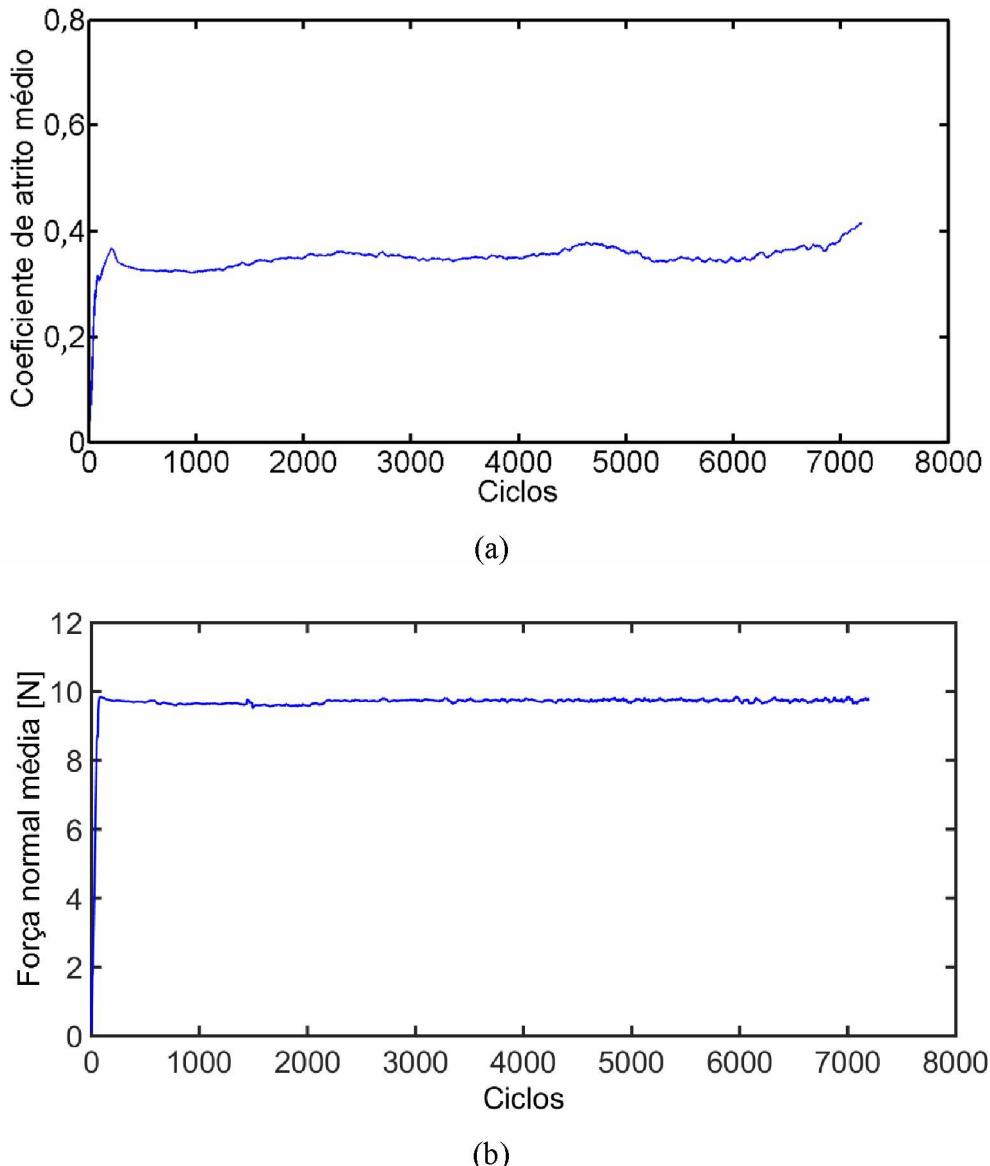


Figura 3.20. (a) Coeficiente de atrito médio. (b) Força normal média de um ensaio realizado no equipamento microtribômetro.

Uma identação foi inserida na amostra para análise da capacidade da técnica de triboscopia de identificar a presença de imperfeições através da variação do coeficiente de atrito. O Microdurômetro (marca: Shimadzu; modelo: HMV Micro Hardness Tester) foi

empregado para a aplicação de 19 N, resultando em identação com diagonal média de 170 μm .

Tabela 3.5. Parâmetros do ensaio experimental apresentando a evolução da trilha.

Parâmetros	
Frequência	2 Hz
Velocidade do motor	3600 rpm
Aceleração do motor	600 rpm
Etapas	20
Duração do ensaio	3600 s
Carga	9,81 N
Carga de parada	0,3 N

Foi realizada a caracterização morfológica e a avaliação triboscópica ao longo de cada etapa, assim como ao longo de todo ensaio. Os resultados obtidos foram comparados aos dos experimentos com somente uma etapa (ensaios de validação), observando o efeito das paradas para captura de imagem nos mecanismos de desgaste.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentadas e discutidas as principais ideias que motivaram o projeto do novo microtribômetro, a validação do equipamento e os principais resultados obtidos. Além disso, foi realizado um estudo dos limites e potencialidades do equipamento e metodologia proposta contemplando as análises: 1 - fidelidade do tamanho dos eventos gerados com microdurezas; 2 - força de operação máxima suportada pelo equipamento; 3 - evolução da trilha de desgaste em um ponto específico utilizando microscopia óptica; 4 - comportamento tribológico e da temperatura do contato em ensaios com superfície texturizadas e lubrificadas.

4.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO MICROTRIBÔMETRO, PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DA SIMULAÇÃO

Posteriormente à aquisição e fabricação das peças, o microtribômetro foi construído e a instrumentação ajustada ao tipo de ensaio – deslizamento com movimento alternado, com obtenção de forças tangenciais, normais e aquisição de imagens. A calibração dos instrumentos, o desenvolvimento da programação de controle funcional do equipamento e a otimização do processo contemplaram a Etapa 3 do projeto do equipamento, conforme Fig. 3.4.

A calibração individual dos instrumentos foi realizada de acordo com os padrões dos fabricantes, garantindo que a leitura das forças normais, tangenciais e laterais correspondessem aos valores reais. Contudo, a montagem da célula de carga com um atuador piezelétrico acoplado à uma mesa coordenadora (mesa z) resultou num sistema mecânico sujeito a deformações mecânicas e rotações devido à presença de guias lineares na mesa z e ao comprimento do braço gerado pelo conjunto, representando exigências no controle e na calibração do equipamento como um todo. Esse controle depende da atuação simultânea da mesa, da célula de carga e do atuador piezelétrico. Fora isso, o atuador piezelétrico apresenta

limitação na sua faixa de trabalho. Tendo em vista essa limitação, é necessário que a mesa z atue de forma a evitar a perda de contato durante o carregamento. Ou seja, quando o PZT alcança o valor máximo de sua faixa de operação, a mesa z se desloca positivamente e o PZT recua para compensar o deslocamento da mesma, obtendo assim uma nova área de trabalho dentro do seu range. De forma análoga, quando o PZT tem seu valor mínimo, a mesa z é recuada e o PZT é avançado.

Com o objetivo de assegurar a eficácia da operacionalidade do equipamento para as condições de ensaio, o conjunto (mesa z , célula de carga, atuador piezelétrico e pórtico) foi avaliado através da faixa operacional da força normal, em que as identações realizadas no microtribômetro foram comparadas com as do microdurômetro, como apresentado na Fig. 4.1.

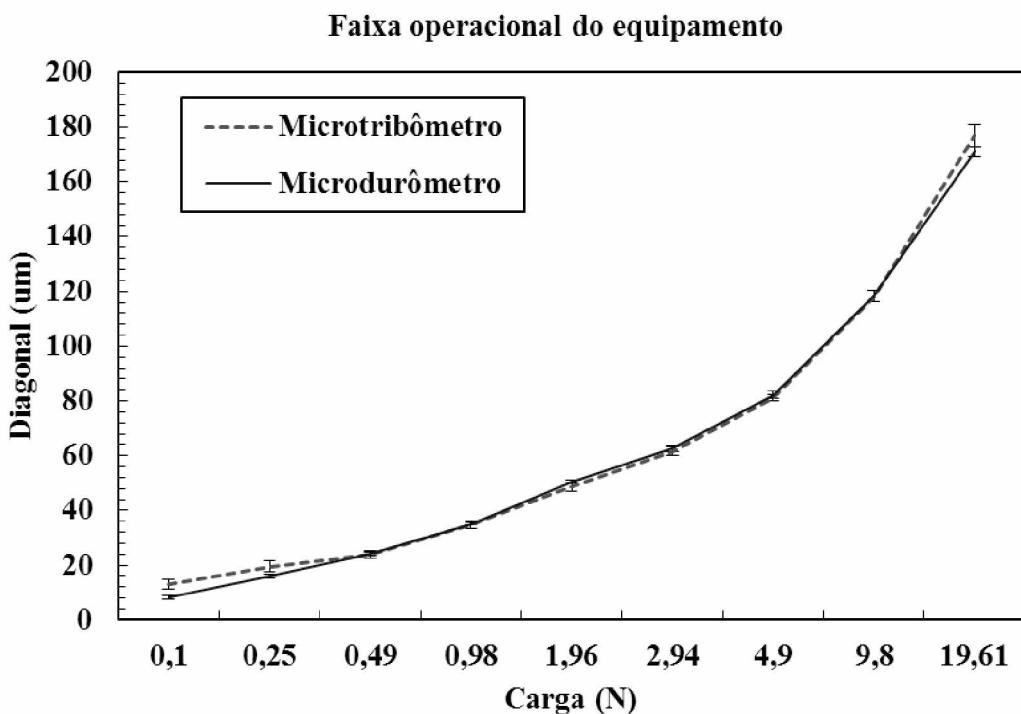


Figura 4.1. Gráfico correlacionando a diagonal média com a carga. Aço ABNT 1020.

Foi observado que, para valores inferiores a aproximadamente 0,3 N e superiores a 13,0 N, não há equivalência entre as identações dos equipamentos, mas para cargas entre esses limites, os resultados são similares. Portanto, a operacionalidade da força normal do microtribômetro é válida no intervalo entre 0,3 N e 13,0 N, aproximadamente. O limite inferior é justificado para valores menores que 0,3 N, dado que a célula de carga trabalha na

sua faixa de erro. A carga máxima aceitável pela célula de carga é de 120 N, com faixa de erro aproximada de 0,2 % (0,24 N), fornecida pela precisão do sensor piezelétrico. Para valores superiores a 13,0 N, o equipamento perde rigidez devido à montagem de algumas peças do equipamento.

A força transversal provocada pelo movimento alternado no conjunto pode gerar adesão do contracorpo à amostra, bem como interferir nos valores das forças normal, lateral e tangencial, modificando o ângulo reto entre o contracorpo e a amostra e, consequentemente, nos valores do coeficiente de atrito. Para evitar esses erros, a força tangencial foi limitada na direção x e a força lateral na direção y garantindo um ângulo reto entre o contracorpo e o corpo. A limitação foi dada de forma que o torque do braço do conjunto não fosse suficiente para provocar alterações significativas no ângulo de contato.

Por conseguinte, a faixa de trabalho do microtribômetro para os parâmetros frequência, força, torque e amplitude do movimento foi encontrada, como apresentado na Tab. 4.1. Os valores da força tangencial, da força lateral e o torque máximo foram extraídos da calibração da célula de carga.

Tabela 4.1. Faixa de trabalho do microtribômetro.

Parâmetro	Quantificação
Frequência	0,03 a 2 Hz
Força normal (direção z)	0,3 a 13,0 N
Força tangencial (direção x)	5 N
Força lateral na direção y	5 N
Torque máximo	400 N.m
Amplitude	10 ou 20 mm

4.1.1 Rotina de ensaio e programação

Antes de iniciar o ensaio de deslizamento com movimento alternado, o usuário deve realizar alguns procedimentos pré-ensaio para fixar a amostra no porta amostra, ajustar a inclinação da amostra, posicionar a mesa do porta amostra na posição de ensaio e as mesas x , y e z , conforme explorado no ANEXO I.

A Figura 4.2 apresenta o fluxograma da rotina do programa principal de desgaste por deslizamento com movimento alternado. O fluxograma detalhado está ilustrado no ANEXO II.

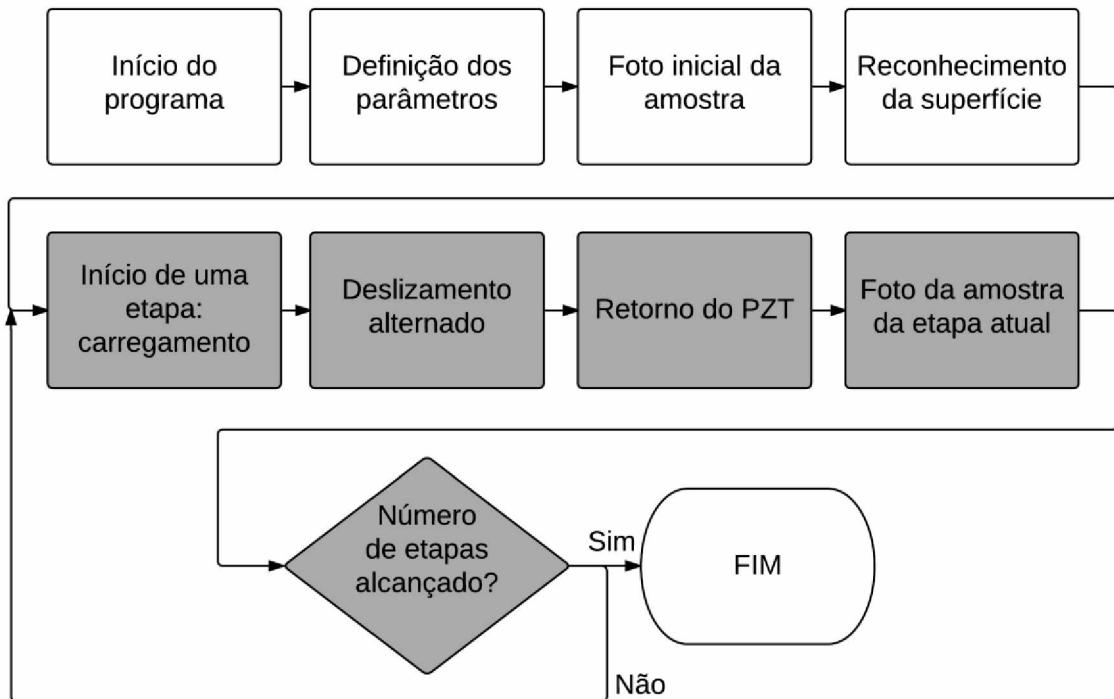


Figura 4.2. Fluxograma do programa de desgaste por deslizamento com movimento alternado.

A definição dos parâmetros é feita no programa principal, Fig. 4.3, no qual são inseridos os seguintes parâmetros de entrada: força normal de parada, número de etapas, velocidade e aceleração do motor, nome da amostra, força normal e tempo de ensaio que depende do número de ciclos ou da distância deslizada. Uma etapa se refere ao processo completo de carregamento, deslizamento e captura de imagem da amostra. Um ciclo do movimento alternado refere-se a uma ida e a uma volta da mesa, ou seja, a uma distância percorrida igual ao dobro da amplitude do movimento. É possível acompanhar através desta interface os valores da força normal aplicada, força transversal, posição do LVDT, velocidade de deslizamento, posição da mesa z. Ao final do ensaio são gerados e registrados os gráficos da força normal (N), força transversal (N) e coeficiente de atrito em função da posição da amostra (μm), ou trilha de desgaste, referente a cada etapa do ensaio.

As mesas x, y posicionam a amostra na lente do microscópio para registrar a primeira imagem referente à posição central da trilha de desgaste, como apresentado no fluxograma da Fig. 4.2. Nessa posição, o foco da imagem é ajustado manualmente.

Ao retornar as mesas para a posição inicial do ensaio (centro da marca de desgaste), o programa de controle executa automaticamente o processo de aproximação do contracorpo utilizando o atuador piezelétrico (PZT) até que a força normal de parada ($\sim 0,3$ N) seja atingida. Essa força normal de parada é utilizada somente no processo de reconhecimento da superfície.

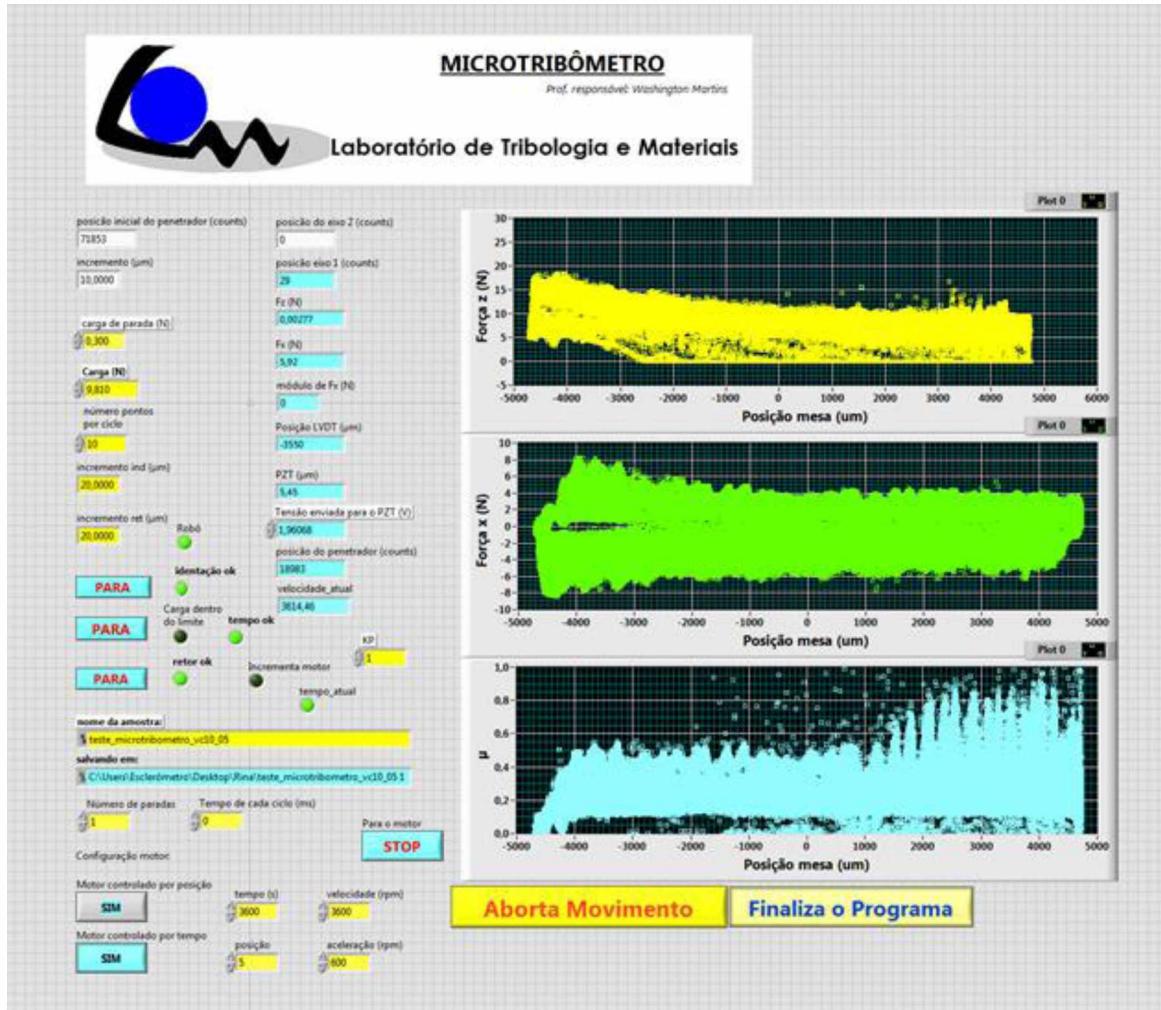


Figura 4.3. Tela do programa principal - LabView®.

Uma etapa é iniciada com o carregamento através do avanço da mesa z de forma que o contracorpo atue sobre a amostra até que a força normal lida na célula de carga seja equivalente à força normal definida para o ensaio (inserida pelo usuário). Simultaneamente ao processo de carregamento, ativa-se o motor e inicia-se o movimento alternado. Com o objetivo de evitar o movimento brusco no início do ensaio entre as superfícies durante a

aceleração do motor, foi utilizado um carregamento proporcional à rampa de aceleração do motor.

O movimento alternado prossegue até completar o número de ciclos de desgaste definido para cada etapa. A Figura 4.4 apresenta uma das telas da sequência de programação que executa o controle do carregamento durante o deslizamento.

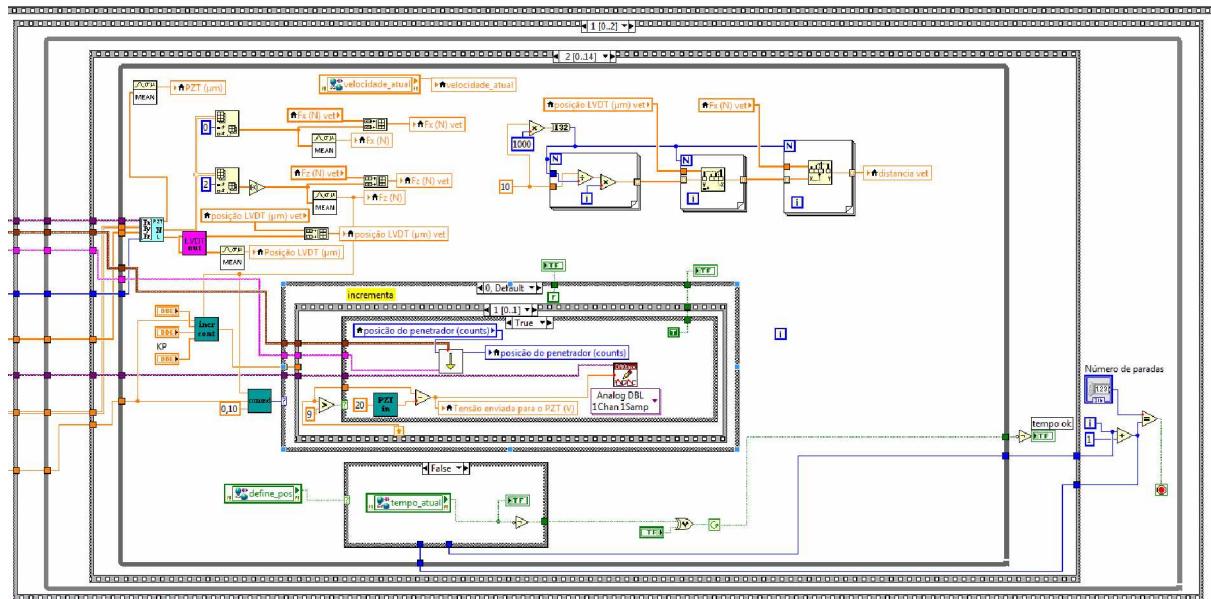


Figura 4.4. Exemplo de uma tela da sequência de programação do controle do carregamento - LabView®.

Um detalhe importante do controle desse ensaio se refere à faixa de operação reduzida do atuador piezelétrico ($28 \mu\text{m}$). Principalmente no início de cada etapa, o contracorpo pode variar muito sua posição podendo alcançar o fim de curso do atuador. Nesse caso, para manter o controle da força normal a posição do penetrador é corrigida utilizando a mesa z, permitindo o controle através do atuador piezelétrico.

Ao final do movimento de deslizamento e antes do período de desaceleração do motor, o atuador retorna bruscamente até o total descarregamento da força normal para evitar que o contato carregado com baixa velocidade altere as imagens dos mecanismos de desgastes gerados.

Finalizando uma etapa do ensaio, o programa executa a rotina de posicionamento e obtenção da imagem pelo microscópio óptico em uma posição específica da trilha de desgaste. Após a coleta da imagem, a amostra é novamente posicionada no ponto central da trilha de desgaste em relação ao penetrador. Caso o número de fases seja maior que 1, inicia-

se um novo passo e um novo carregamento até que seja alcançado o número de etapas desejado (Fig. 4.2).

Ao concluir todas as etapas, as informações geradas de força na direção z (carregamento), da força na direção x (força transversal), do coeficiente de atrito (μ), da posição da trilha de desgaste e do número de ciclos são automaticamente armazenadas em uma matriz e salvas em um arquivo de texto (.txt). Esse arquivo é utilizado no pós processamento para gerar o mapa de desgaste da triboscopia. O programa também salva automaticamente os arquivos de imagem (.jpeg) registrados ao longo do ensaio entre cada etapa. A tela principal do programa retorna valores da força z , x e do μ ao longo da posição da mesa (trilha de desgaste) como mostrado na Fig. 4.3.

Um sistema de segurança que garante a atuação do equipamento na faixa de trabalho foi desenvolvido e está apresentado no Anexo III

4.2 VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO

4.2.1 Controle da força normal

No tribômetro comercial Plint®, a força normal do tribossistema é fornecida diretamente através de um peso morto. Em superfícies rugosas ou desniveladas, esse tipo de carregamento apresenta desvantagens visto que as direções da força de reação e da força peso não permanecem colineares. Como apresentado nas teorias, o controle da força normal de um tribossistema é um assunto bastante estudado na literatura (ANTONOV; HUSSAINOVA;ADOBERG, 2013). Trabalhos anteriores mostraram que a inércia tem efeito significativo no carregamento (ANTONOV; HUSSAINOVA;ADOBERG, 2013).

Consequentemente, devido à inércia gerada no movimento, a força normal real no contato é diferente da força aplicada pelo peso morto, não sendo possível controlá-la ou medi-la. Esse efeito é mais intenso no regime transitório como consequência da rugosidade inicial (ANTONOV; HUSSAINOVA;ADOBERG, 2011). Em ensaios cuja força normal é controlada via peso morto, a intensidade da força normal tende a ser menor que a nominal devido à variação causada pelo ângulo entre a direção da força peso e a força de reação da superfície.

No microtribômetro, a força normal é dinamicamente monitorada através da utilização do controle em malha fechada tomando como referência a leitura da força normal pela célula de carga. A resposta rápida do sistema de controle é garantida devido ao funcionamento analógico do atuador piezelétrico. Por exemplo, ensaios com força normal de 9,81 N em amostras niveladas de aço VC 10 revestidas com níquel químico e contracorpo esférico de aço SAE 52100 de diâmetro de 5 mm apresentam uma força normal média igual a $9,55 \pm 0,19$ N. Nesse exemplo, o erro máximo entre a força normal e a nominal foi de 2,65 %, garantindo a eficiência do carregamento através do sistema de controle desenvolvido para o microtribômetro. A evolução da força normal média de cada ciclo em função do número de ciclos está apresentada na Fig. 4.5 para 5 ensaios realizados no material VC10 com revestimento de níquel químico. O tempo total desses ensaios foi de 3600 s.

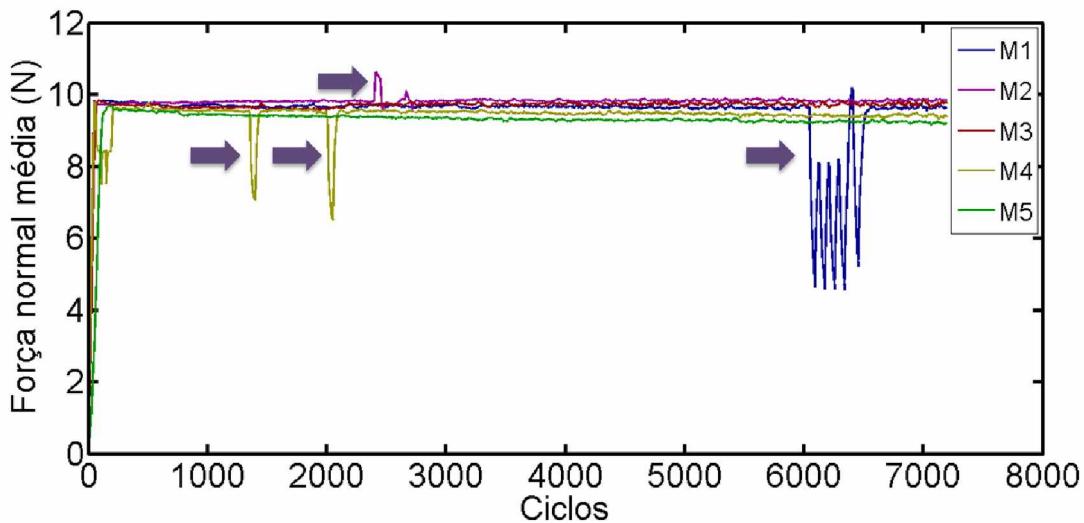


Figura 4.5. Curva de força normal média ao longo dos ciclos de cada ensaio do microtribômetro. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.

A força normal permanece constante ao longo do ensaio exceto por algumas oscilações, Fig. 4.5. Essas oscilações indicadas através das setas são causadas pelo deslocamento da mesa z para compensar a faixa restrita do atuador piezelétrico. Nesse caso, essas oscilações não se devem às inclinações da amostra, mas aos fenômenos que ocorrem durante o processo de desgaste. Por exemplo, as irregularidades observadas nos instantes finais do ensaio M1 podem ser justificadas pelo acúmulo de partículas de desgaste ou material aderido em determinadas regiões da marca de desgaste que forçaram a atuação do sistema de controle em alguns ciclos até alcançar a força normal desejada.

As variações e o controle da força normal ao longo da posição da trilha de desgaste também são observadas através da triboscopia apresentada na Fig. 4.6 para o ensaio na amostra M1 (Fig. 4.5).

No ensaio apresentado, o valor da força normal permaneceu uniforme ao longo da posição da amostra na maior parte do tempo de ensaio. Esse fato foi atribuído ao procedimento de nivelamento prévio da amostra em relação ao contracorpo, (tópico 3.2.2). Também foi notada a oscilação significativa da força normal (seta) no final do ensaio que levou ao acionamento do sistema de controle. Esse controle garante que, mesmo com a limitação de deslocamento do atuador piezelétrico, o controle de força normal continue ativo.

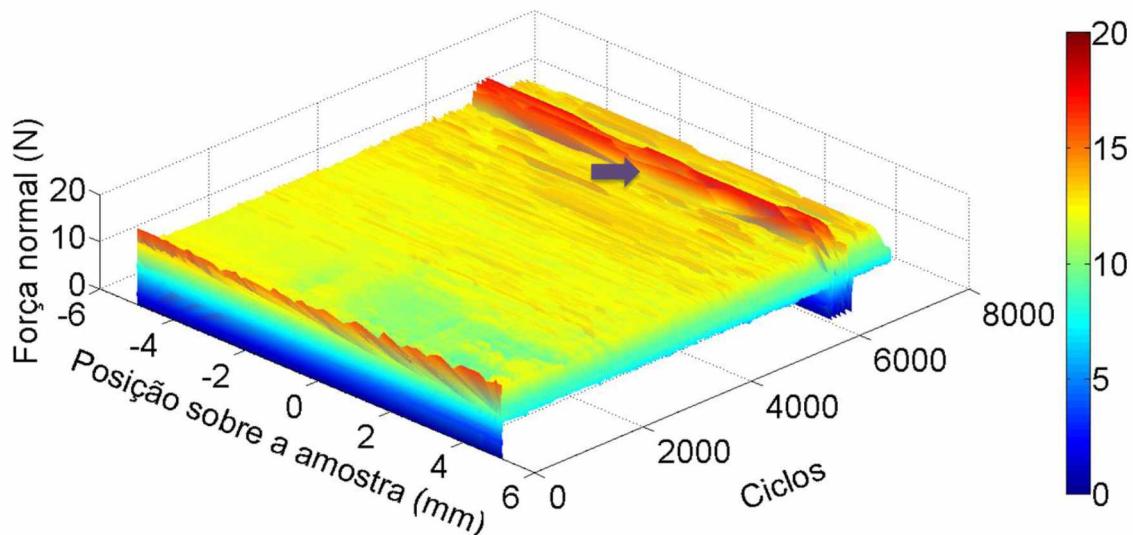


Figura 4.6. Triboscopia mostrando a variação da força normal ao longo da posição na trilha de desgaste e ao longo do tempo de ensaio. Ensaio M1. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.

Na maioria dos ensaios, o sistema de controle foi acionado somente uma vez para adequar a posição relativa do atuador com a força normal desejada. Um comparativo entre a resposta da força normal média sem atuação do sistema de controle (ensaio M3) e com atuação em vários momentos (ensaio M1) está apresentado na Fig. 4.7.

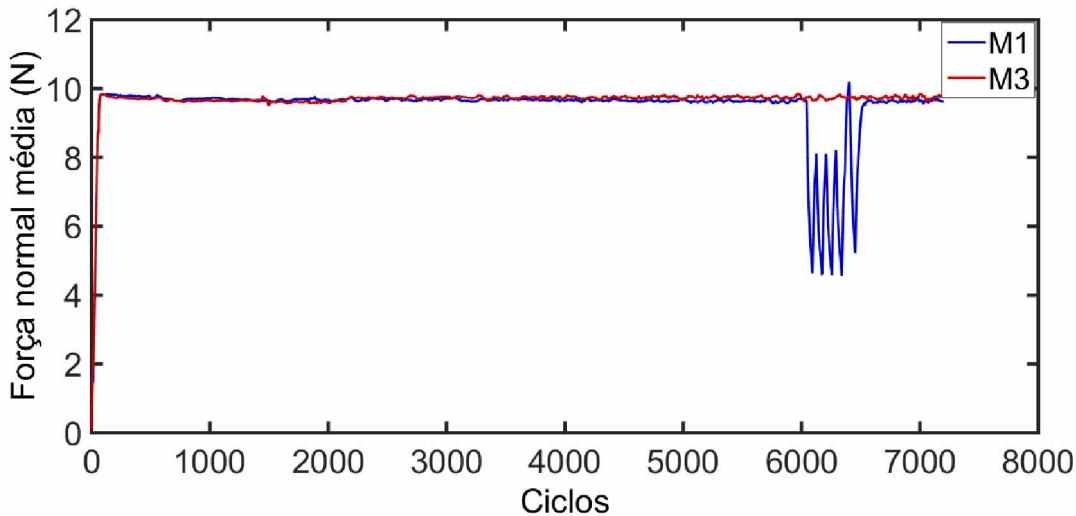


Figura 4.7. Curva de força normal média ao longo dos ciclos dos ensaios M1 e M3. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.

A autora considera que a atuação do sistema de controle é suficiente para retomar o valor inserido pelo usuário, conforme apresentado na curva do ensaio M3 da Fig. 4.7. Nos ciclos onde não foi necessária a correção utilizando o sistema de controle, as curvas apresentaram valores próximos ao da força normal desejada, com erros menores que 4 %.

4.2.2 Caracterização superficial e mecanismos de desgaste

A morfologia das trilhas de desgaste foi avaliada usando microscopia eletrônica de varredura (MEV) com elétrons retroespalhados (BSE), como apresentado na Fig. 4.8.

Foi observada a boa semelhança da morfologia da marca de desgaste para os ensaios realizados em tribômetros diferentes mantendo as mesmas condições de ensaio. A suavização das marcas de retífica nas trilhas de desgaste, o desenvolvimento da tribocamada no sentido do deslizamento, a coloração mais escura nas bordas das trilhas e nas marcas da retífica evidenciaram a morfologia parecida entre as marcas de desgaste produzidas nos diferentes equipamentos.

A formação da tribocamada foi notada em regiões preferenciais da marca de desgaste. Tais regiões são os vales das marcas do processo de retificação que originou a topografia da amostra. Durante os ensaios de desgaste, a tribocamada concentrou-se principalmente nos vales das marcas de retífica e nas bordas das trilhas.

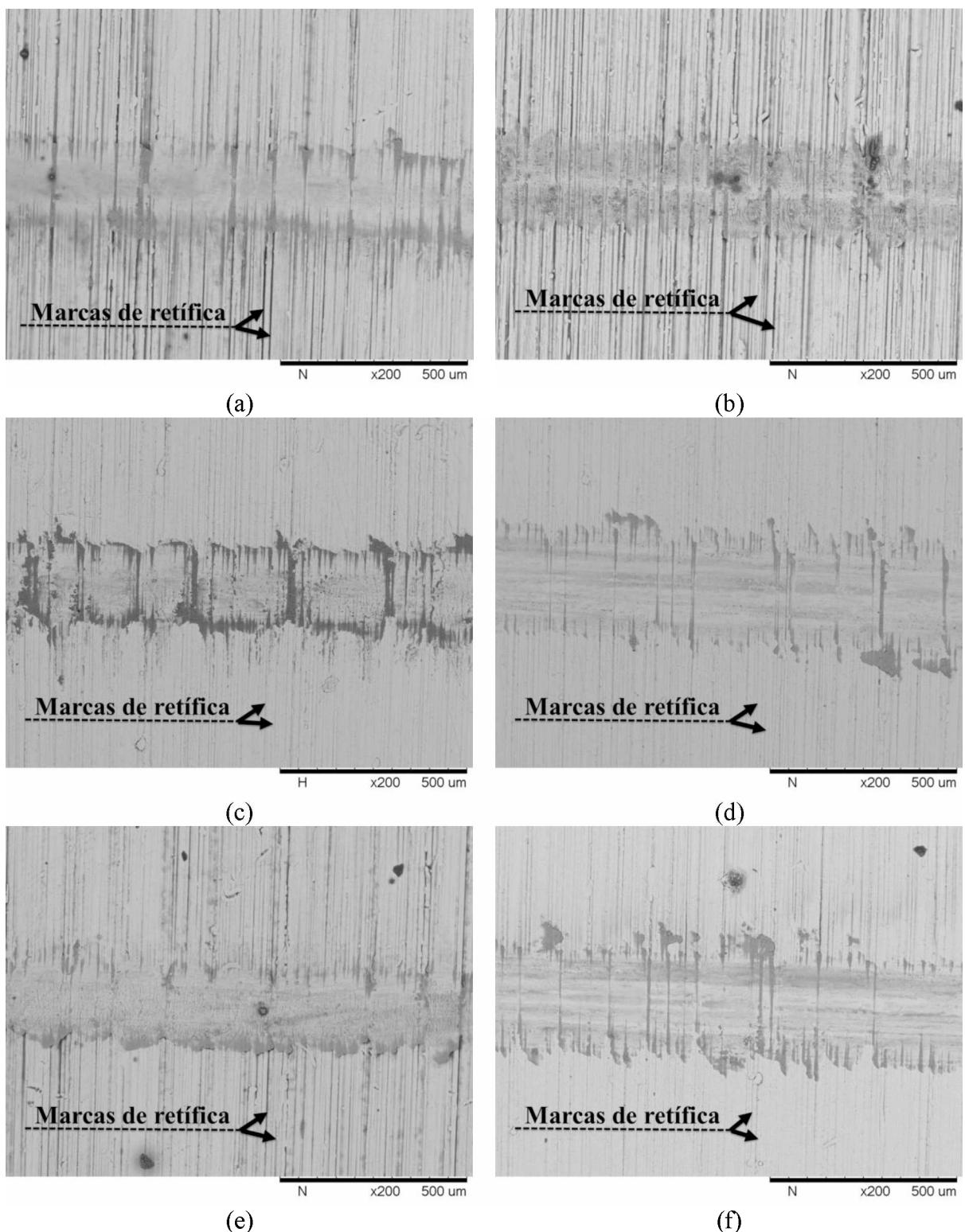


Figura 4.8. Imagens via MEV-BSE da marca de desgaste observada na posição central da trilha para ensaio de deslizamento com movimento alternado via microtribômetro (a) M1, (c) M2, (e) M3, e via Plint® (b) P1, (d) P2, (f) P3. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.

Segundo OLOFSSON et al. (2011), a topografia da superfície tem um papel importante no depósito de partículas de desgaste. Essas partículas, ao se aglomerarem, são oxidadas e fragmentadas devido à pressão de contato e formam uma tribocamada (BISWAS, 2000). Provavelmente, os vales decorrentes da topografia das marcas de retífica atuam como uma textura, comportando-se como um reservatório de partículas que participam do processo de formação de tribocamada (PETTERSSON ;JACOBSON, 2003). A Figura 4.9 apresenta um exemplo das regiões de formação seletiva da tribocamada.

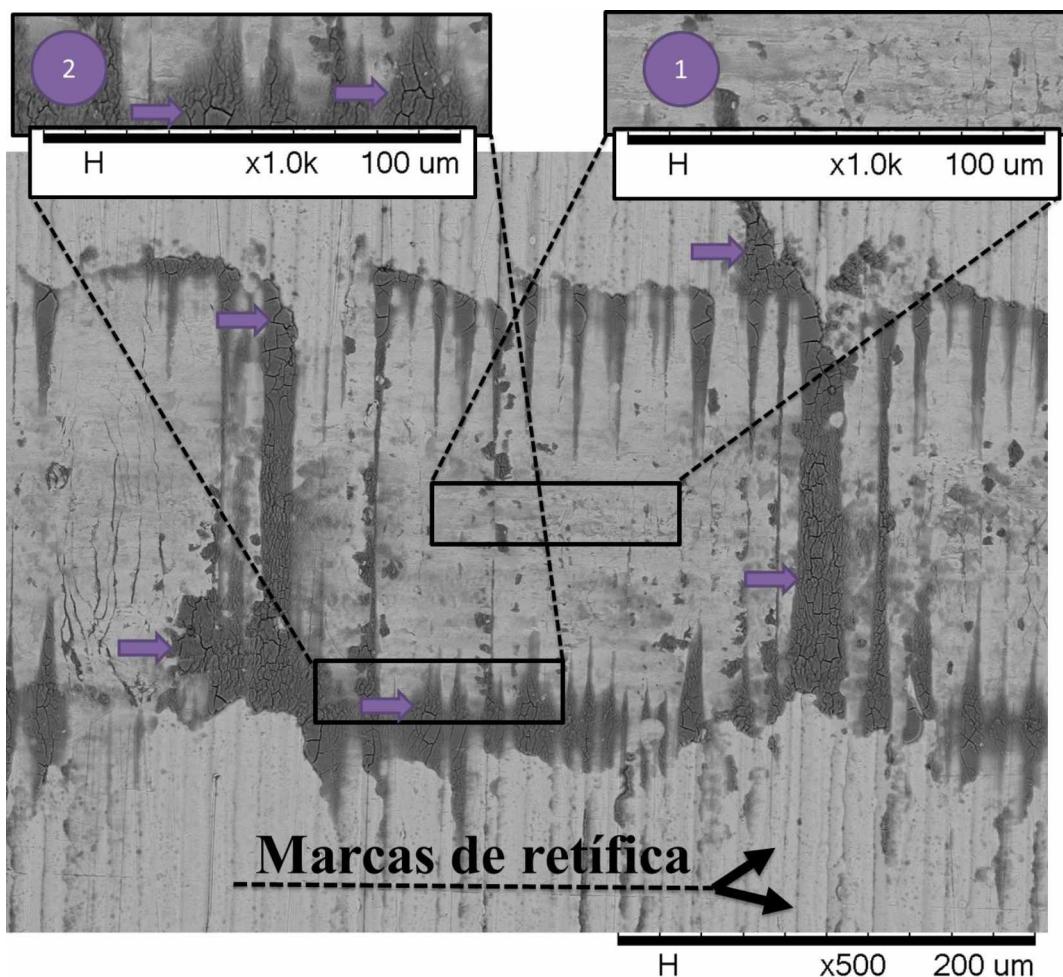


Figura 4.9. Posição central da trilha do ensaio M2 utilizando o microtribômetro identificando a formação da tribocamada. MEV-BSE. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.

Nessas imagens, a variação da coloração é dada pelo fenômeno de difração dos átomos (BSE). O sensor BSE está posicionado de forma que capture somente os elétrons que interagem com o núcleo dos átomos da superfície da amostra. Ou seja, quando um átomo tem

grande número atômico, é mais provável a interação entre elétrons e o núcleo do átomo e a coloração será mais clara. Como o tamanho do átomo do oxigênio é pequeno, foi considerado nesse trabalho que quanto maior a proporção da tonalidade cinza, maior a probabilidade da presença de elementos de baixo número atômico como o oxigênio (CULLITY, 2011).

Nesse caso, a tribocamada apresenta uma coloração cinza-claro, menos uniforme (estágio 1) e um estágio mais avançado, com uma camada de coloração cinza-escuro composta por trincas mais significativas indicadas pelas setas roxas (estágio 2). A presença de trincas indica a fragilidade da tribocamada, que pode estar associada à resposta frágil do óxido de ferro formado. As tensões trativas desenvolvidas na região de contato levam à formação e propagação dessas trincas durante o deslizamento (KIMURA, 1983; HUTCHINGS, 1992; BHUSHAN, 2013). O efeito triboquímico localizou-se nas asperezas da superfície.

De fato, a topografia decorrente do processo de retífica induz diferentes respostas na trilha de desgaste. Na região dos picos houve o predomínio do contato metálico e as regiões de vales permitiram a criação de uma tribocamada com composição diferente do metal base e com características frágeis (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2005; BHUSHAN, 2013).

Visualizou-se a formação de uma tribocamada não contínua e não homogênea em todos os ensaios, em consequência da fragmentação, deformação e oxidação das partículas de desgaste. A presença das marcas de retífica na trilha de desgaste indicou que o desgaste foi relativamente pequeno para as condições de carregamento e deslizamento. Ou seja, as condições tribológicas impostas não foram suficientemente severas para remover totalmente as marcas de retífica e gerar uma topografia lisa na marca de desgaste.

A Figura 4.10 apresenta a análise de espectroscopia dispersiva de raios X (EDX) do ensaio M2. Na região externa à marca de desgaste do ensaio M2, houve um indicativo de presença mais significativa de fósforo e níquel que, provavelmente, vieram do revestimento de níquel químico. Na região clara, a formação da tribocamada é perceptível e com o percentual de composição aproximado de oxigênio e de carbono. Além disso, o aparecimento do elemento ferro revelou a adesão de partículas de desgaste oriundas do contracorpo na formação da tribocamada, enquanto que a existência de fósforo e níquel sugeriram a presença de partículas aderidas do próprio revestimento. A região escura apresentou uma quantidade maior de oxigênio. O aumento de oxigênio sugere a produção de partículas de óxidos ao longo da trilha de desgaste através de processos triboquímicos que ocorreram durante o ensaio em ambiente aberto.

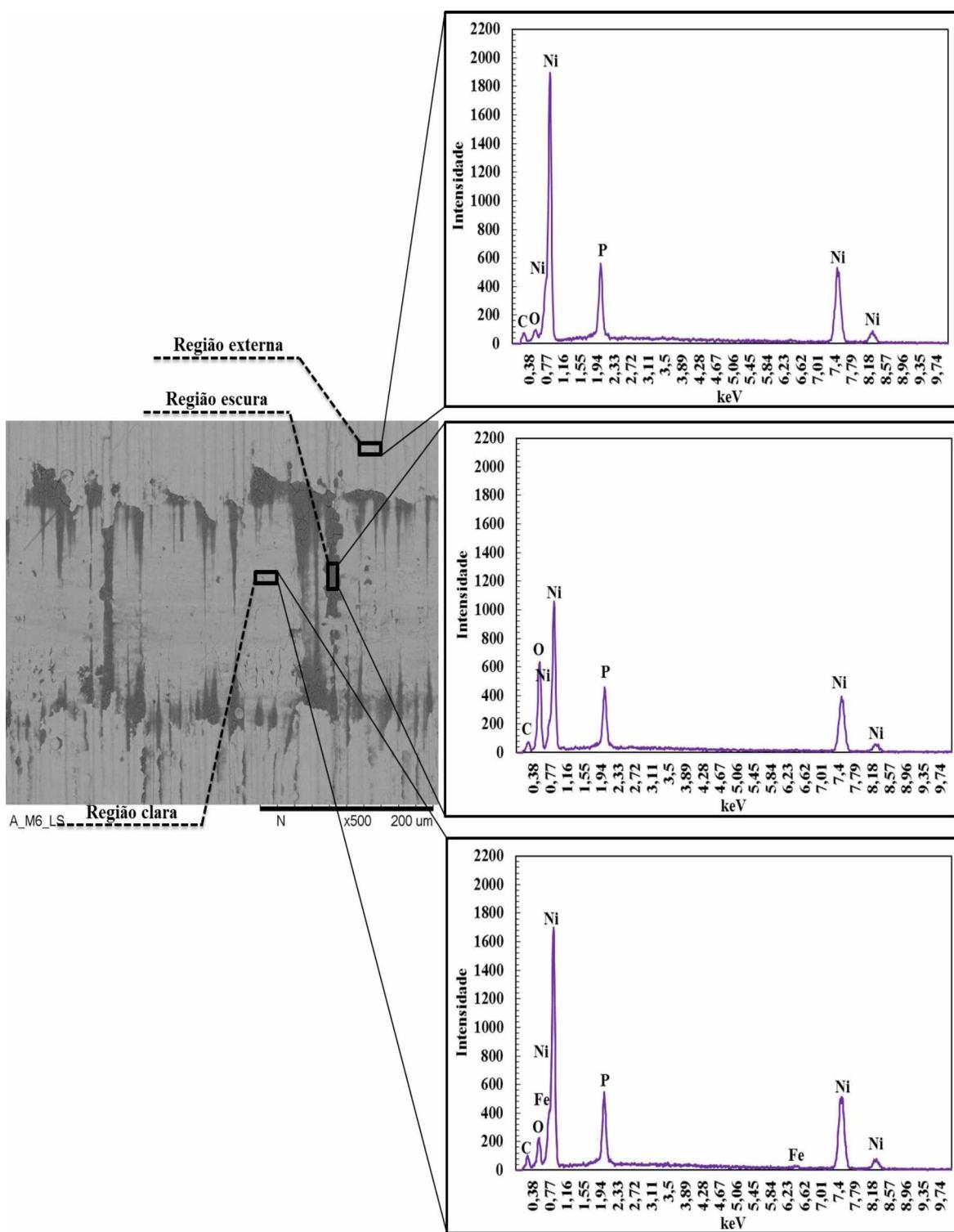


Figura 4.10. Análise química na posição central da trilha do ensaio M2 realizado no microtribômetro identificando a formação da tribocamada. MEV-EDX. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.

A Figura 4.11 apresenta análise química via EDX da marca de desgaste obtida no ensaio P3 realizado no tribômetro comercial Plint®.

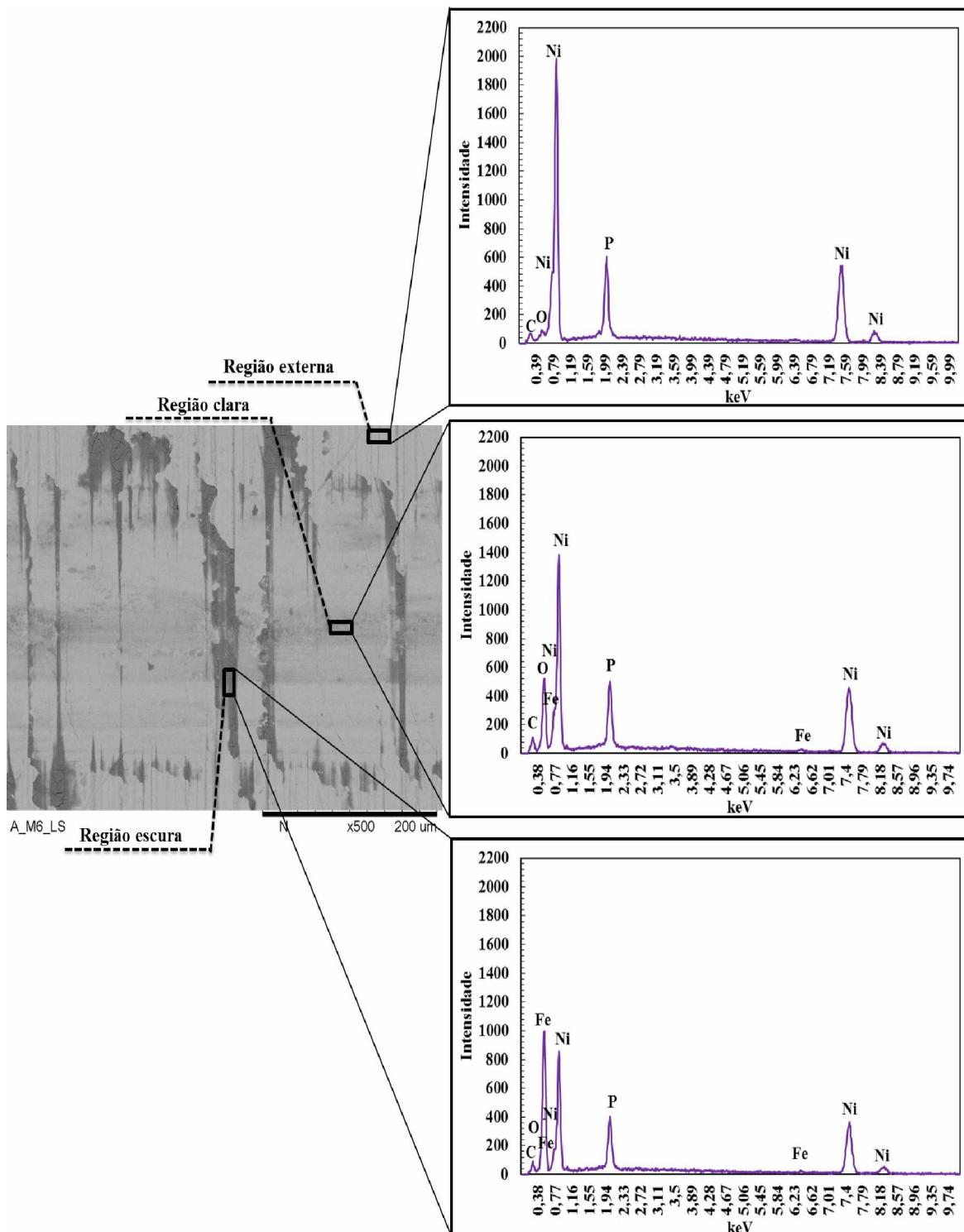


Figura 4.11. Análise química via EDX na posição central da trilha do ensaio P3 realizado no tribômetro Plint® identificando a formação da tribocamada. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.

Assim como nos resultados apresentados no ensaio M2 (da Fig. 4.10), a região externa à marca de desgaste apresentada na Fig. 4.11 não apresentou o elemento ferro, mostrando a ausência de material proveniente do contracorpo. Em contrapartida, a região escura do ensaio P3 evidenciou a presença de ferro (0,40 %), o que não foi observado na mesma região no ensaio M2, sugerindo maior desgaste do contracorpo com transferência de material para a amostra no ensaio P3.

A presença de níquel e fósforo em todas as regiões indicou que os parâmetros tribológicos adotados nos ensaios não foram suficientemente severos para romper ou desgastar totalmente o revestimento de níquel químico. Esse revestimento possui 13 µm de espessura sendo comumente classificado como um revestimento resistente ao desgaste (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).

Também foi observado um comportamento similar para os ensaios M2 e P3 com relação à formação da tribocamada na calota de desgaste dos contracorpos e à adesão de níquel e fósforo procedentes do revestimento da amostra, conforme apresentado nas Fig. 4.12.

Novamente, as regiões claras e escuras foram associadas ao acúmulo de partículas de óxidos e de revestimento em torno da calota de desgaste do contracorpo. Além disso, o material transferido concentrou-se na região externa à área da calota esférica.

Os resultados apresentados permitem concluir que os mecanismos de desgaste predominantes foram a adesão e a oxidação na superfície. A tribocamada foi identificada pela presença de partículas de desgaste e óxidos gerados durante o deslizamento. Não foram observadas marcas características de abrasão na trilha de desgaste. As superfícies analisadas por microscopia óptica estão apresentadas na Fig. 4.13 e Fig 4.14.

A morfologia parecida entre os ensaios também foi notada na microscopia óptica. Foi observado a formação de uma tribocamada não contínua e não homogênea nos corpos e contracorpos. Novamente, as imagens apresentaram o efeito associado à presença das marcas de retífica na formação da tribocomada em conjunto com a suavização da topografia da amostra.

A identificação de elementos parecidos nos mecanismos de desgaste no microtribômetro e no tribômetro comercial Plint® é fundamental para validação do equipamento desenvolvido. A aproximação dos mecanismos nos ensaios realizados nos dois tribômetros indica que os fenômenos que aconteceram durante o deslizamento foram similares. Esses fenômenos são consequências de parâmetros como velocidade, força normal, tipo de material, rugosidade e o meio interfacial (ZUM GAHR, 1987; BHUSHAN, 2001).

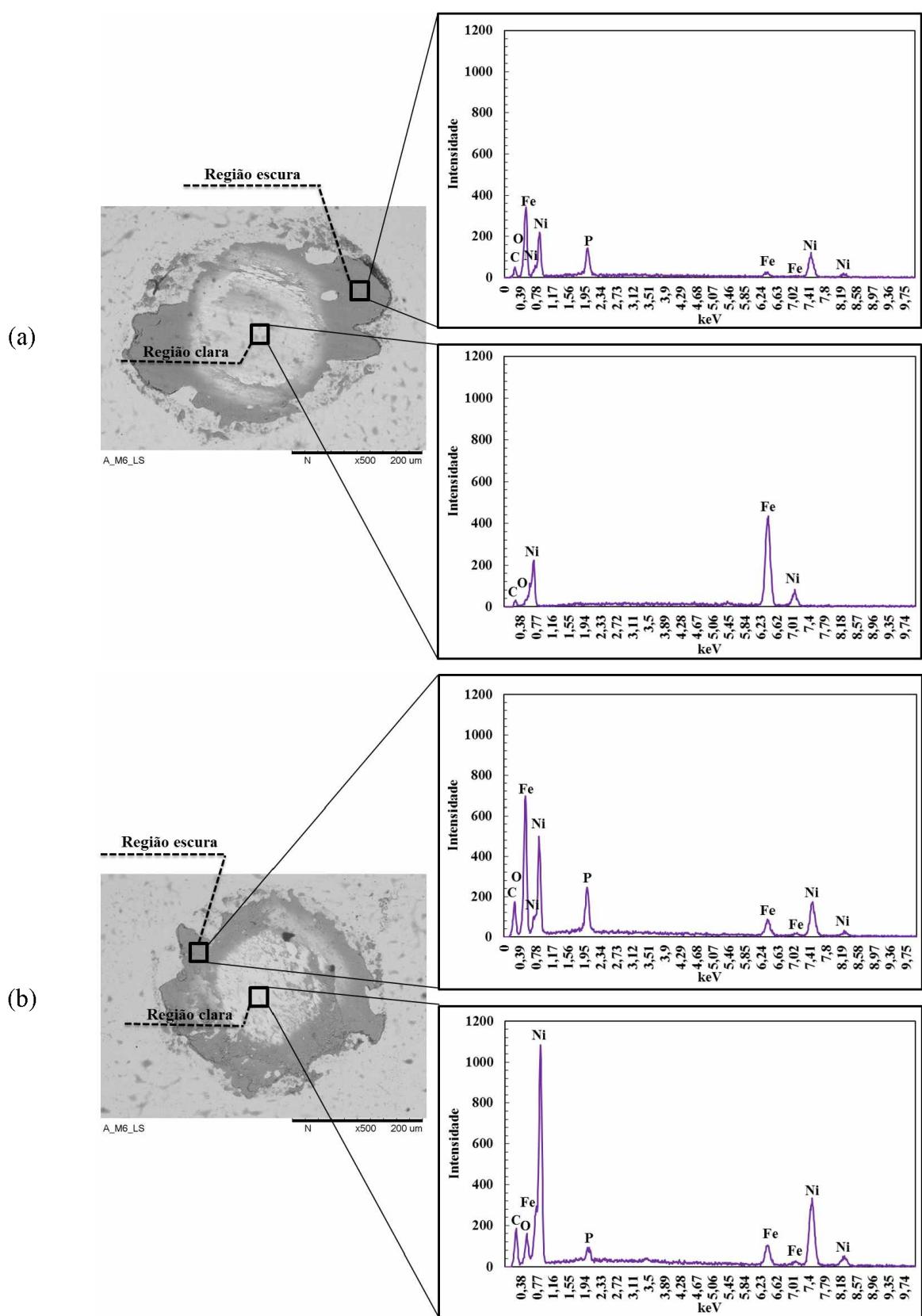


Figura 4.12. Análise química via EDX do contracorpo identificando a formação da tribocamada. (a) Ensaio M2. (b) Ensaio P3. Aço SAE 52100 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.

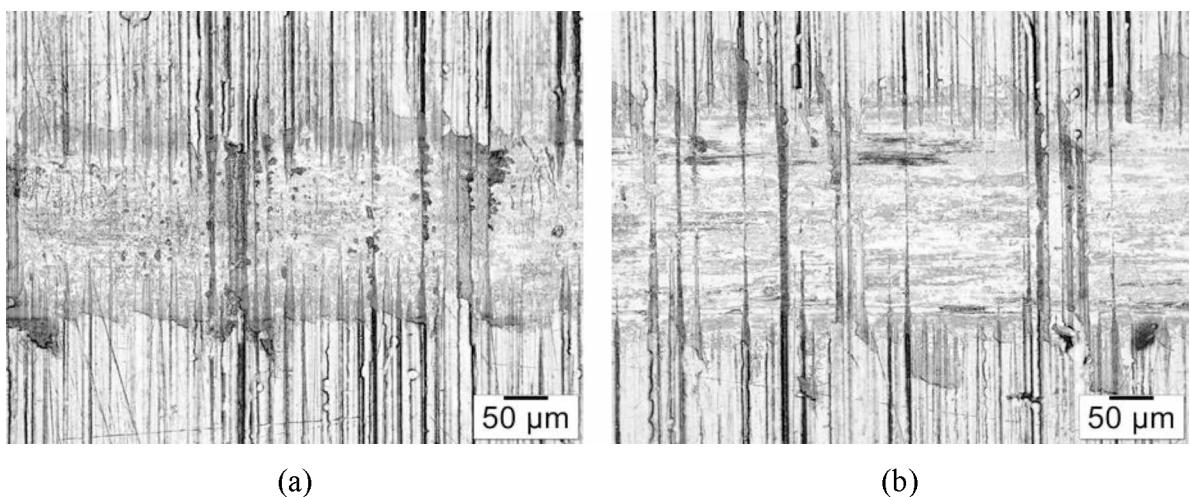


Figura 4.13. Microscopia óptica da amostra na posição central da trilha do ensaio (a) M2, (b) P3. Corpo: Aço VC10 com revestimento de níquel químico.

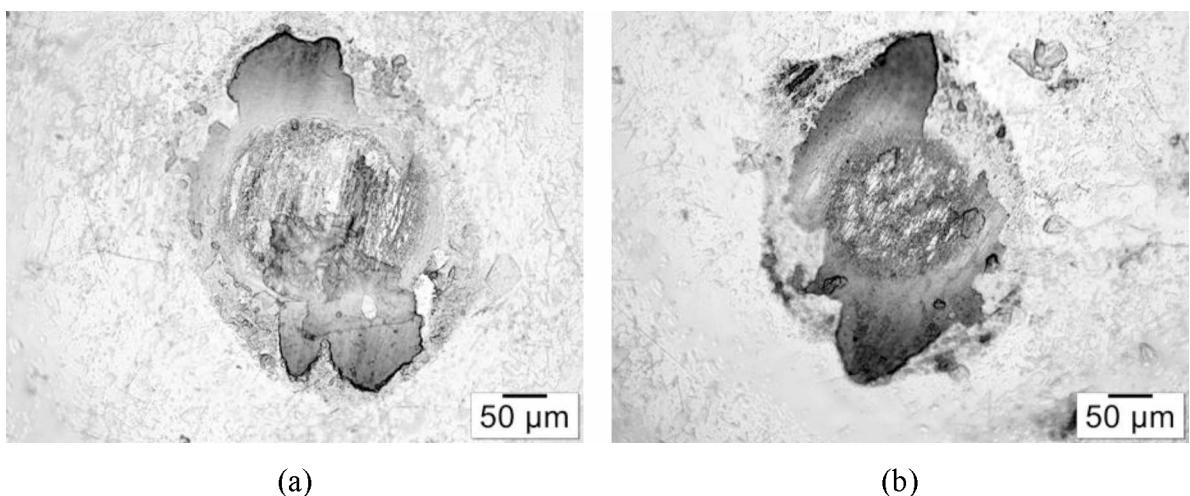


Figura 4.14. Microscopia óptica do contracorpo (c) M2 e (d) P3. Aço SAE 52100. 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.

4.2.3 Volume desgastado

A Figura 4.15 apresenta os resultados de volume desgastado médio da amostra considerando todos os ensaios, comparando os equipamentos microtribômetro e o tribômetro comercial Plint®. A análise estatística pelo método *Anova*, com intervalo de confiança de 95%, mostrou que a média do volume desgastado do corpo é a mesma independentemente do equipamento utilizado. O menor desvio padrão observado para os ensaios realizados no microtribômetro ($\pm 23,22 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3$) em comparação com os ensaios realizados no tribômetro

comercial Plint® ($\pm 158,17 \text{ } 10^3 \mu\text{m}^3$) foi atribuído ao controle da força normal empregado nos ensaios. O controle dinâmico da força normal utilizado no microtribômetro tende a diminuir os efeitos das irregularidades da topografia da amostra atenuando erros associados e melhorando a repetitividade dos resultados (tópico 4.2.1.).

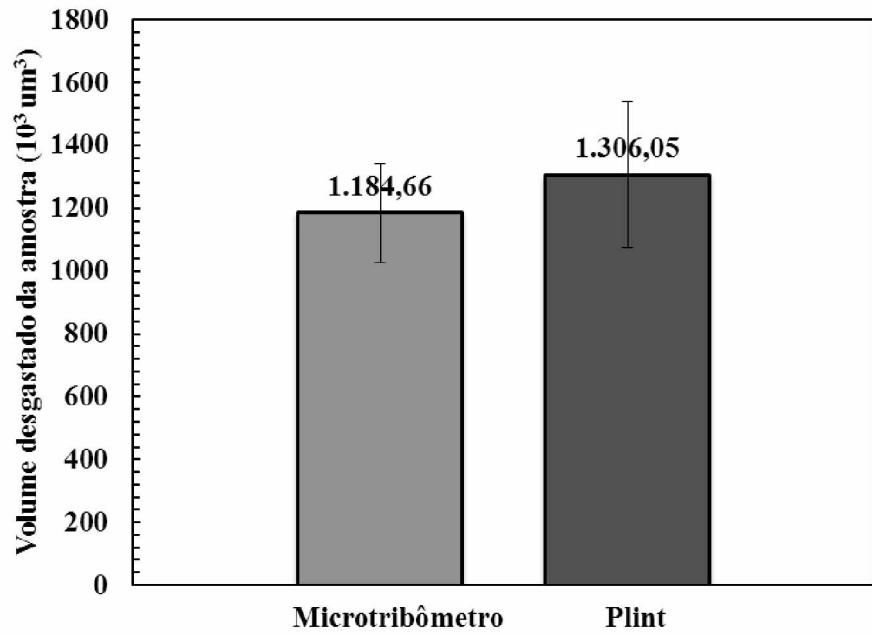


Figura 4.15. Média do volume desgastado da amostra dos ensaios realizados no microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.

A Figura 4.16 apresenta o volume desgastado dos contracorpos em ambos os equipamentos. De forma análoga ao cálculo dos corpos, pelo método estatístico *Anova*, com intervalo de confiança de 95%, a média do volume desgastado do contracorpo foram iguais nos desgastes dos contracorpos dos ensaios realizados no microtribômetro e na Plint®. Novamente, foi observado maior desvio padrão ($\pm 1,65 \text{ } 10^3 \mu\text{m}^3$) no ensaios realizados no tribômetro Plint® em relação aos ensaios realizados no microtribômetro ($\pm 0,89 \text{ } 10^3 \mu\text{m}^3$).

A Figura 4.17 apresenta o volume desgastado do par em ambos os equipamentos. A avaliação do volume desgastado (ou massa dividido pela densidade) é a forma mais comum de quantificar o desgaste. A média do volume desgastado é igual em ambos os equipamentos. Os cálculos do método estatístico *Anova* com intervalo de confiança de 95% confirmam, novamente, a igualdade e a validação do equipamento desenvolvido. O desvio padrão é maior na Plint® ($\pm 233,37 \text{ } 10^3 \mu\text{m}^3$) em relação ao microtribômetro ($\pm 158,29 \text{ } 10^3 \mu\text{m}^3$).

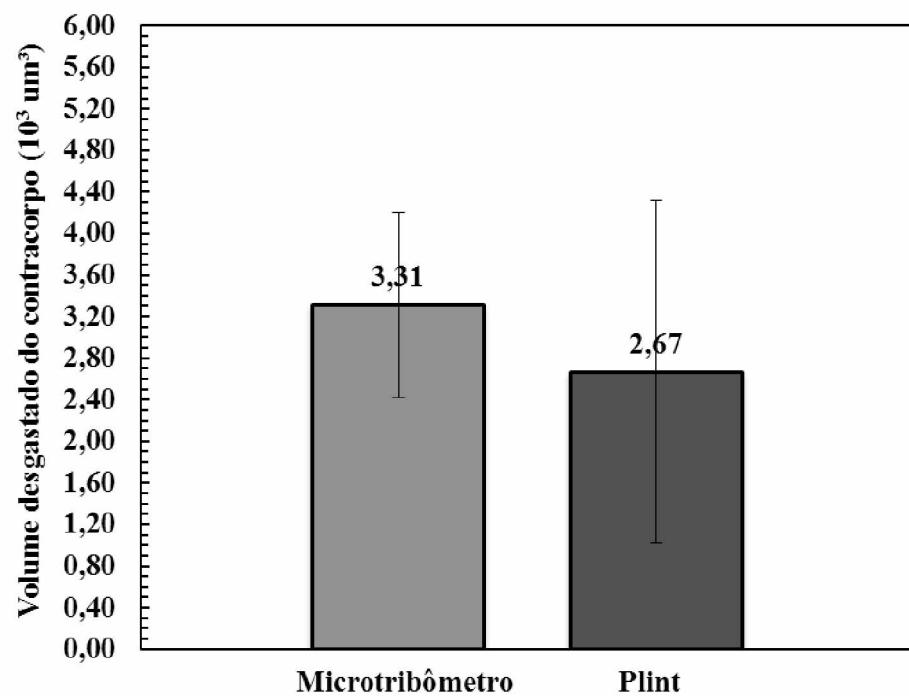


Figura 4.16. Média do volume desgastado dos contracorpos dos ensaios realizados no microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®. Aço SAE 52100, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.

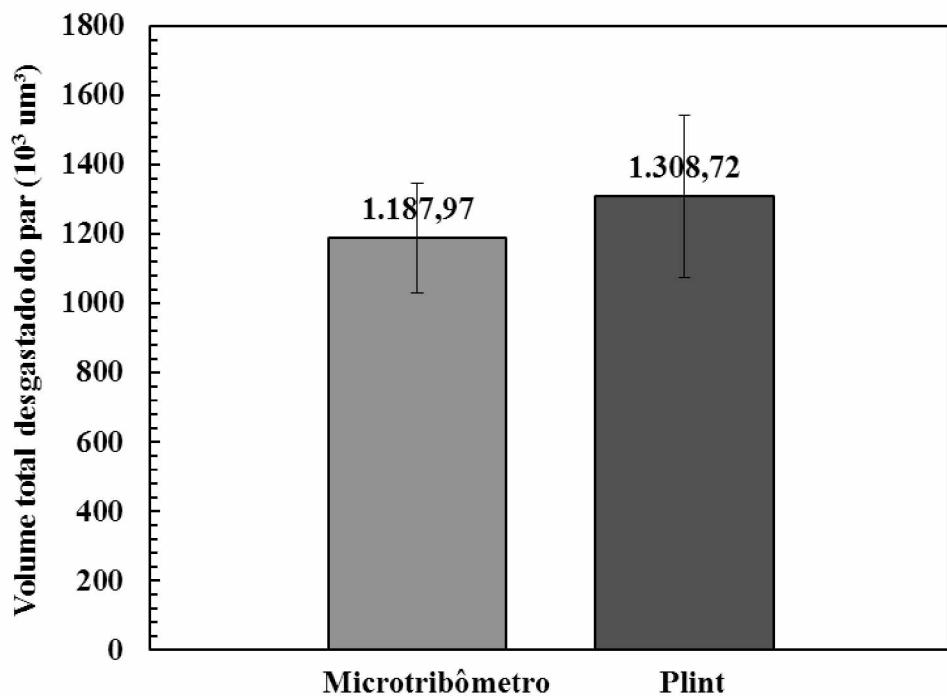


Figura 4.17. Média do volume desgastado do par dos ensaios realizados no microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®. Aço VC10 com revestimento de níquel químico e contracorpo SAE 52100, 9,81 N, 2 Hz, ao ar, 7200 ciclos.

4.2.4 Coeficiente de atrito e triboscopia

A Figura 4.18 apresenta os resultados do coeficiente de atrito médio calculados no regime permanente entre os equipamentos microtribômetro e o tribômetro comercial Plint®.

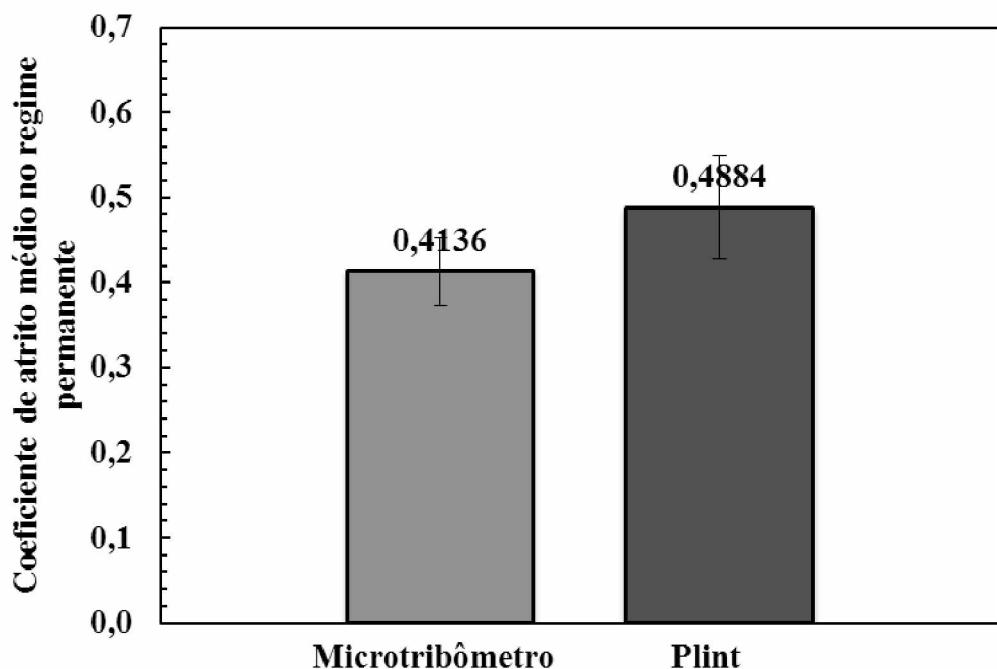


Figura 4.18. Coeficiente de atrito médio registrado no regime permanente nos ensaios realizados no microtribômetro e no tribômetro Plint®. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.

O regime permanente definido no tópico 3.3.1 foi considerado como o regime onde há estabilização do coeficiente de atrito ocorrendo a partir de 4000 ciclos de ensaio para todos os casos. Os ensaios realizados no microtribômetro e na Plint® apresentaram uma média de $0,4136 \pm 0,04$ e $0,4884 \pm 0,06$ no coeficiente de atrito do regime permanente, respectivamente. O menor erro relativo nos ensaios realizados no microtribômetro (9,7 % comparado a 12,3 %) indica melhor repetitividade dos resultados obtidos nesse equipamento. A análise *Anova*, com intervalo de confiança de 95 %, mostrou que o coeficiente de atrito médio no regime permanente entre os equipamentos foram próximos, mas não iguais, com diferença de 15 % entre eles. Assim como o observado nos resultados de volume desgastado (Fig. 4.17), o controle da força normal afetou os resultados de coeficiente de atrito apresentando valores maiores de média e desvio padrão para o tribômetro comercial. Esse

resultado mostra que tanto para o desgaste (Fig. 4.17) quanto para o atrito (Fig. 4.18) o controle ativo do microtribômetro interferiu positivamente na sensibilidade do ensaio.

Os coeficientes de atrito médio de cada ciclo (média de uma ida e uma volta) em função do número de ciclos dos ensaios do microtribômetro estão apresentados na Fig. 4.19.

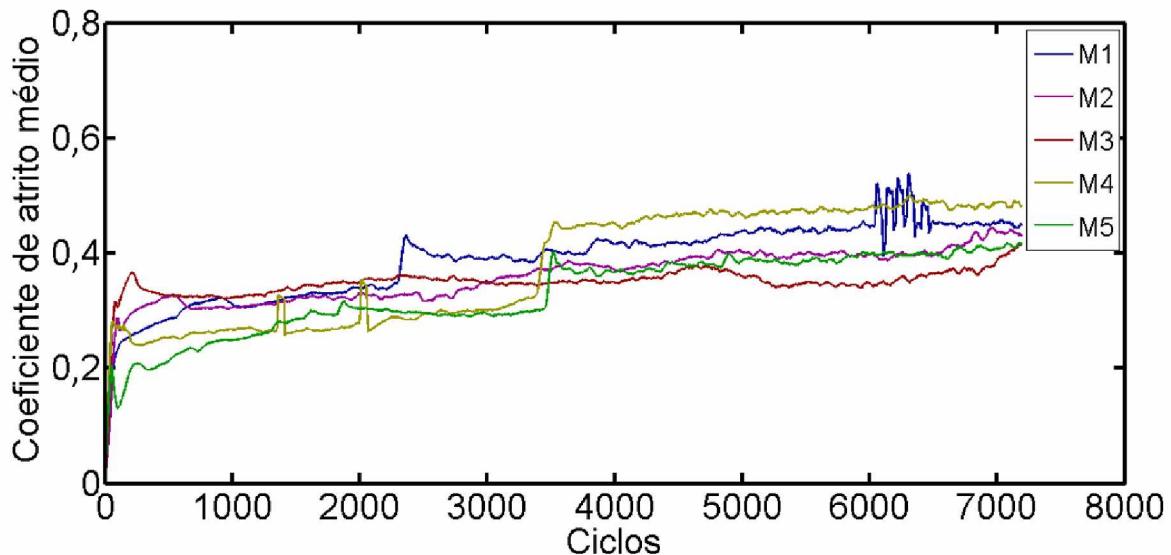


Figura 4.19. Coeficiente de atrito médio dos ensaios realizados no microtribômetro. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.

O aumento do coeficiente de atrito nos instantes iniciais do processo de desgaste *running-in* pode estar relacionado a possíveis espécies adsorvidas na superfície, presença de contaminantes e à rugosidade inicial da superfície (BLAU, 1981; 2005). Os picos iniciais do coeficiente de atrito são justificados pela presença da rugosidade do revestimento também resultante das marcas geradas no processo de retificação. Ao longo do ensaio, o deslizamento suavizou a topografia da amostra, atenuando os picos iniciais. A elevação do coeficiente de atrito no regime transitório é consequência do desgaste inicial e da ruptura de partículas do revestimento provocada pelo movimento de deslizamento. A instabilidade do regime transitório está associada aos aspectos mecânicos e microestrutural, com a possível formação de óxidos e, consequente, geração de tribocamada (BLAU, 1981; BLAU, 2008; BLAU, 2015).

O coeficiente de atrito estabilizou-se quando houve equilíbrio entre a formação e degradação da tribocamada caracterizado pelo regime permanente de desgaste que ocorreu em aproximadamente 4000 ciclos em todos os casos. A Figura 4.19 mostra que as curvas

convergiram para valores próximos tanto no regime transitivo (antes de 4000 ciclos) quanto no permanente de desgaste.

A Figura 4.20 apresenta os coeficientes de atrito médio dos ensaios realizados no tribômetro Plint®.

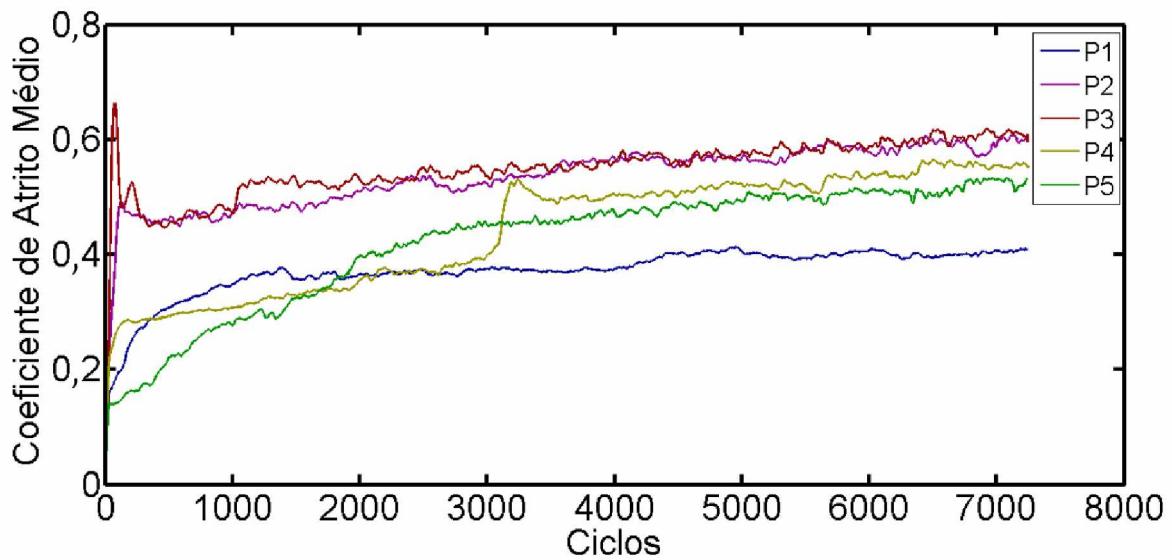


Figura 4.20. Coeficiente de atrito médio dos ensaios realizados no tribômetro Plint®. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.

Foi observado a maior variação dos valores de coeficiente de atrito no regime transitório e posterior estabilização no regime permanente. Os valores de coeficiente de atrito são maiores quando comparados com os resultados obtidos no microtribômetro. Essa diferença também foi atribuída ao controle ativo da força normal empregado nos ensaios no microtribômetro. Os ensaios que utilizam o carregamento tipo peso morto (tribômetro Plint®) apresentam maior instabilidade durante o regime transitório. Esse fato foi associado à formação de óxidos, adesão e geração de tribocamada na superfície de contato (BLAU, 1981; 2005; BLAU, 2008; BLAU, 2015).

A comparação entre as curvas de coeficiente de atrito para os dois tribômetros está apresentado na Fig. 4.21.

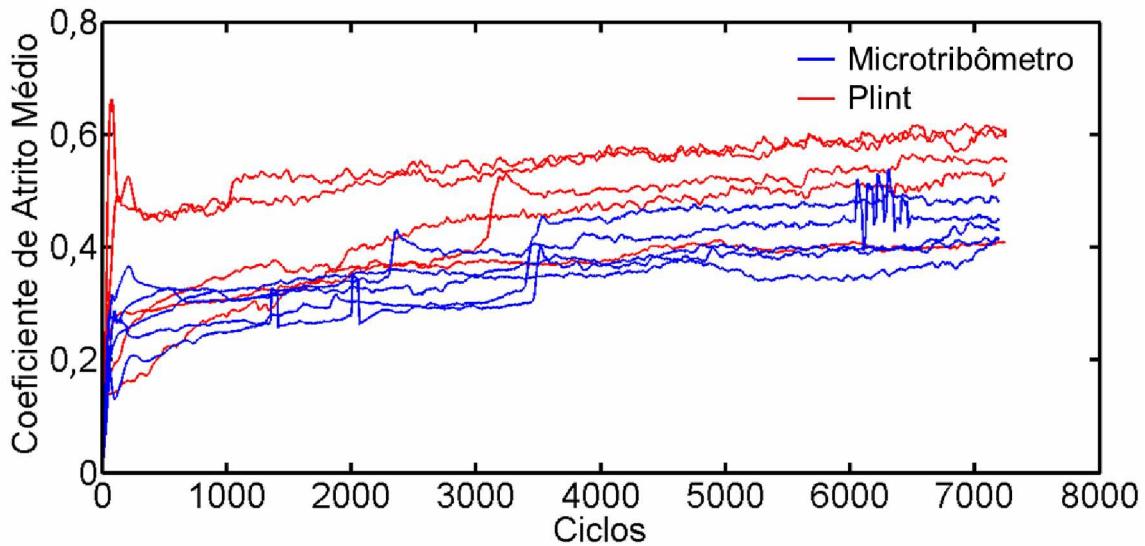


Figura 4.21. Coeficiente de atrito médio dos ensaios realizados no Microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.

Os mapas de triboscopia dos ensaios M2 e P3 estão apresentados na Fig. 4.22. Conforme detalhado no tópico 3.7, esse gráfico apresenta o coeficiente de atrito em função da posição ao longo da trilha de desgaste indicada no eixo x , número de ciclos indicado em y . Nesse gráfico 3D, o mapa de cores define o valor do coeficiente de atrito.

O coeficiente de atrito aumentou ao longo do número de ciclos, ou seja, ao longo da distância percorrida, justificado pelo desgaste inicial e ruptura de partículas do revestimento (BLAU, 1981; BLAU, 2008). As setas roxas indicam a mudança brusca do coeficiente de atrito nos ciclos iniciais que podem ser associados à rugosidade decorrente do processo de retificação.

A Figura 4.23 apresenta o coeficiente de atrito médio de cada ciclo em função do número de ciclos para os ensaios M2 e P3.

Assim como nos mapas de triboscopia 3D, Fig. 4.22, as setas roxas apontam a mudança brusca do coeficiente de atrito nos ciclos iniciais. No ensaio realizado na Plint® (P3), o coeficiente de atrito é superior quando comparado ao ensaio do microtribômetro (M2), apresentando um coeficiente médio em regime permanente de $0,5438 \pm 0,1508$ e $0,3913 \pm 0,0215$, respectivamente, confirmando a média total do coeficiente em regime permanente apresentado na Fig. 4.18.

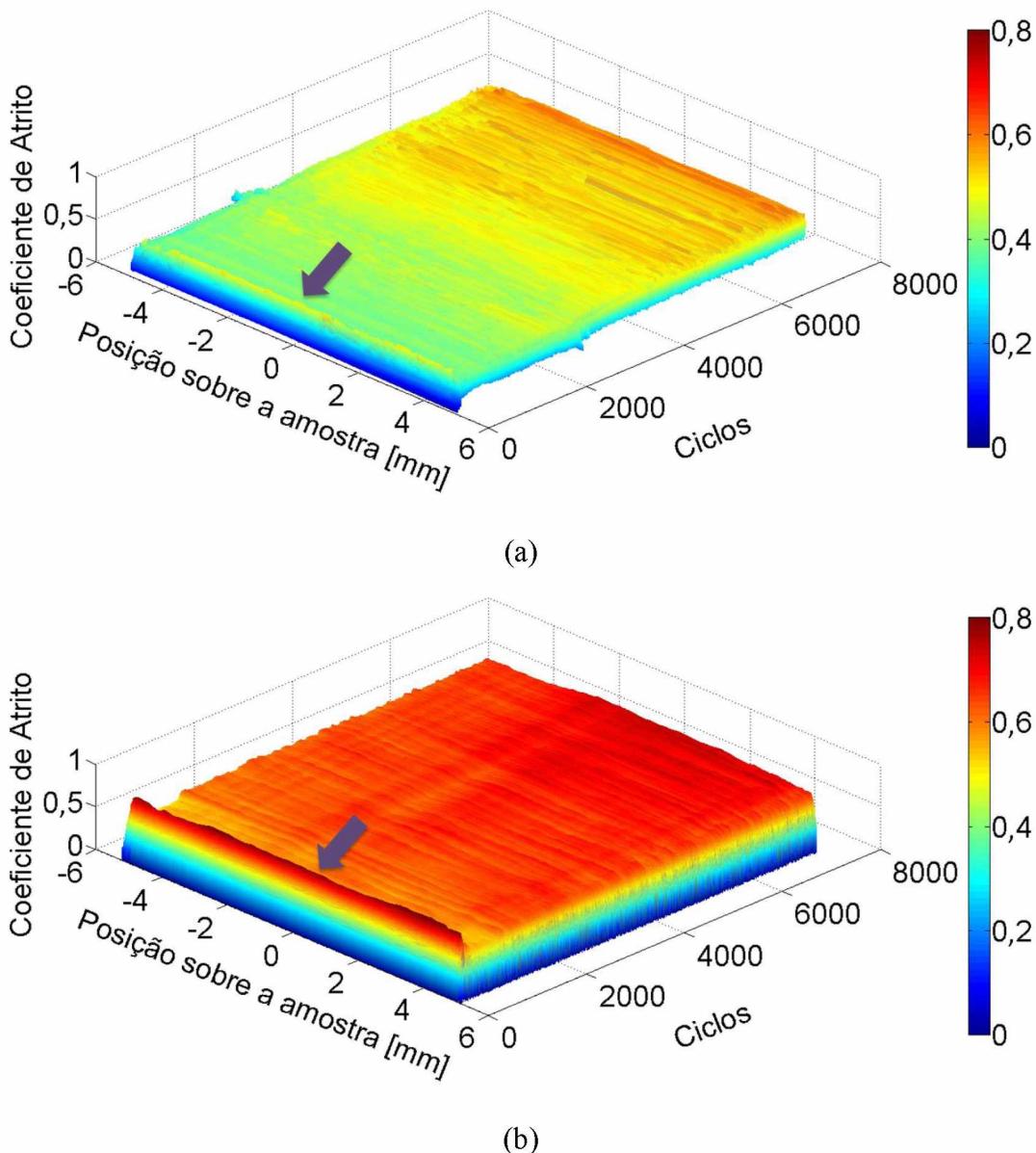


Figura 4.22. Mapas de triboscopia dos ensaios (a) M2 e (b) P3 realizados no microtribômetro e na Plint[®], respectivamente. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.

O mapa de triboscopia do ensaio M1 está apresentado na Fig. 4.24. A seta roxa indica a variação de coeficiente de atrito resultante do processo de correção do controle para a compensação do range do PZT, como apresentado no tópico 4.1.1. Durante a compensação, a ausência de contato em alguns pontos diminui o valor médio da força normal. Quando se reduz a força normal, o coeficiente de atrito aumenta (HUTCHINGS, 1992; BLAU, 2008).

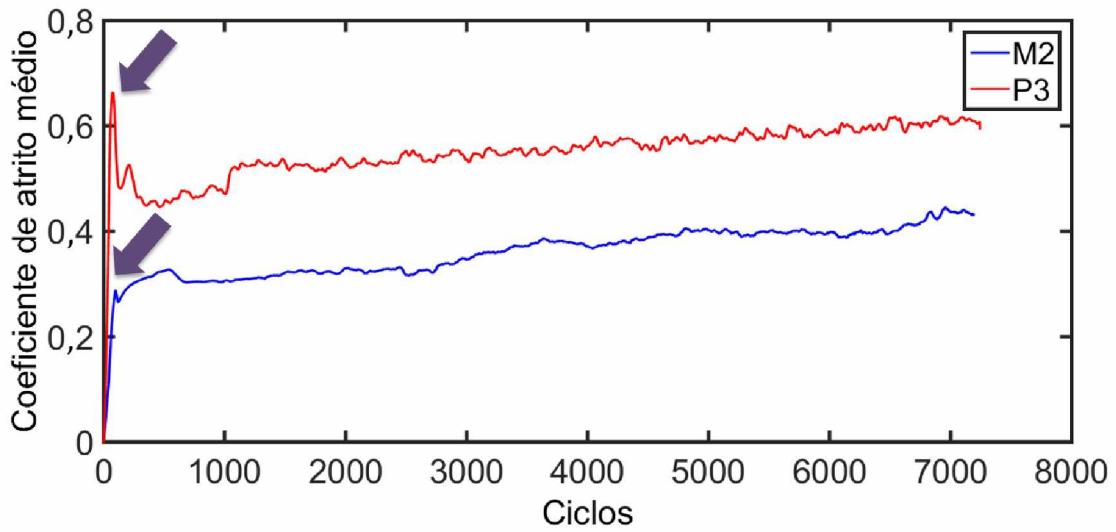


Figura 4.23. Coeficiente de atrito dos ensaios M2 e P3 realizados no microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®, respectivamente. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.

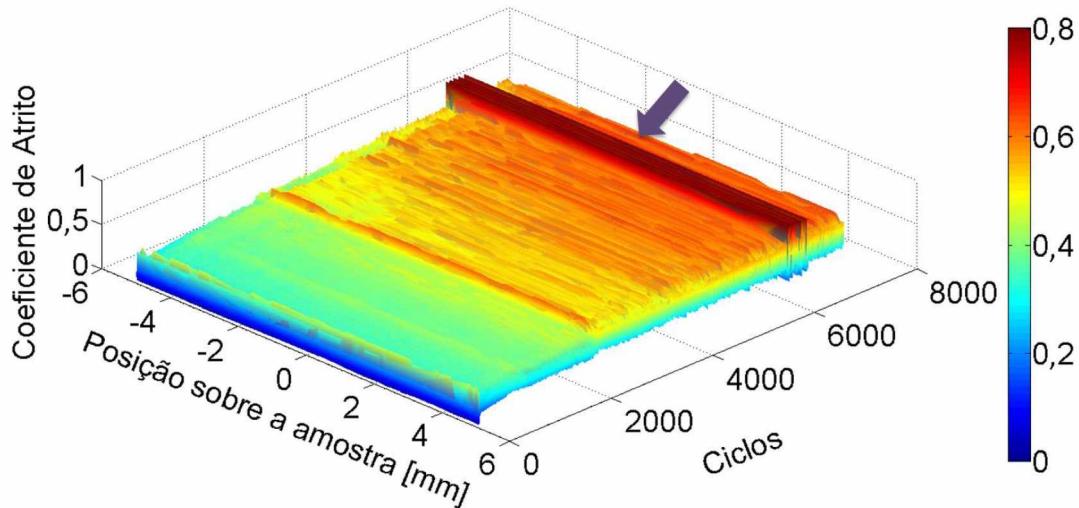


Figura 4.24. Mapa de triboscopia do ensaio M1. Aço VC10 com revestimento de níquel químico, 9,81 N, 2 Hz, ao ar.

A técnica triboscopia foi desenvolvida para melhorar o significado e para facilitar a análise espacial e temporal dos fenômenos que ocorrem durante ensaios tribológicos de deslizamento com movimento alternado, tornando mais fácil a visualização de informações pertinentes através do processamento dos dados amostrados via imagem triboscópica (BELIN & MARTIN, 1992b; BELIN, 1993; SÁNCHEZ-LÓPEZ et al., 2002; DOS SANTOS; COSTA;DE MELLO, 2015). Os gráficos de triboscopia apresentados contribuíram para

análise dinâmica de comportamentos específicos ao longo do ensaio, como o movimento de compensação do range do PZT e picos do coeficiente de atrito gerados pelas interações tribológicas. Foi possível observar simultaneamente fenômenos ao longo do número de ciclos e da posição amostra, não identificando defeitos em posições específicas da amostra.

4.2.5 Evolução da trilha de desgaste

A sequência de imagens de um ensaio da amostra de aço VC10 revestida com níquel químico, força normal 9,81 N, com contracorpo esférico de aço SAE 52100 de diâmetro de 5 mm, 2 Hz é apresentada na Fig. 4.25.

Através da captura de imagens, é possível observar fenômenos envolvidos durante o deslizamento. Com o aumento do número de ciclos, a formação da trilha de desgaste ficou mais evidente nas imagens obtidas. A adesão provoca ruptura e deslocamento de partículas que, em conjunto com deformações plásticas, contribuem para a formação da tribocamada. O deslizamento da esfera provoca suavização da marca de retífica nos ciclos finais (Fig. 4.25e e Fig. 4.25f).

A sequência de imagens de um ensaio repetindo a mesma condição anterior com a adição de um defeito induzido (identação) na trilha de desgaste é apresentada na Fig. 4.26.

As partículas de desgaste se acumularam na identação inserida, preenchendo o vale formado pela identação em conjunto com deformações plásticas. As marcas de retífica, presentes na trilha nos ciclos iniciais do movimento de deslizamento, foram suavizadas pelo movimento da esfera nos ciclos finais. Além disso, o desgaste foi mais severo nas últimas etapas (transição da Fig. 4.26e para Fig. 4.26f), aumentando o número de partículas e contribuindo para ruptura de material na superfície da trilha.

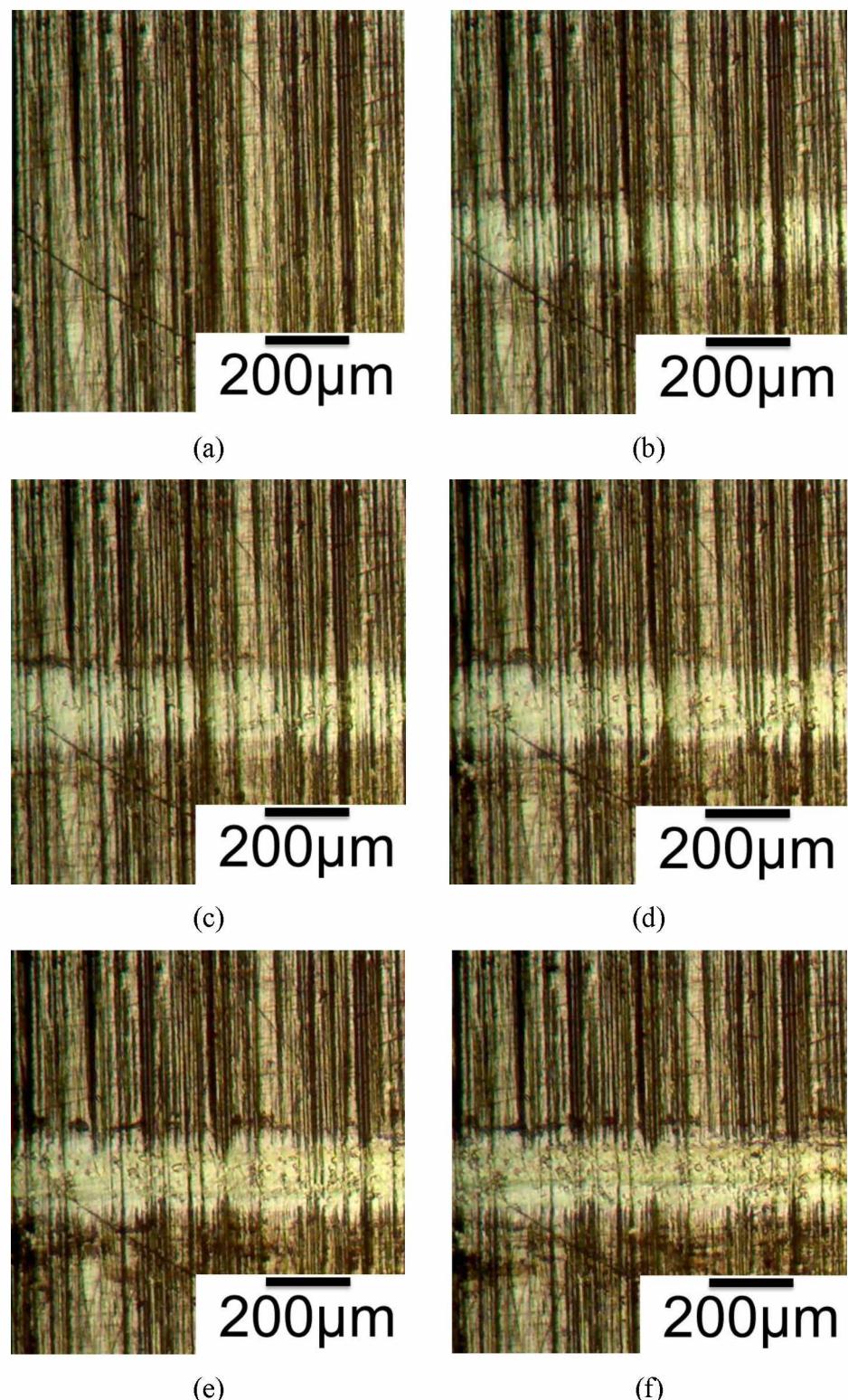


Figura 4.25. Evolução da trilha de desgaste. Amostra de aço VC10 revestida com níquel químico, força normal 9,81 N, frequência 2 Hz, ao ar. (a) ciclo 0, distância percorrida 0 m. (b) ciclo 1080, 21,6 m. (c) ciclo 2160, 43,2 m. (d) ciclo 3240, 64,8 m. (e) ciclo 4320, 86,4 m. (f) ciclo 5400, 108,0 m.

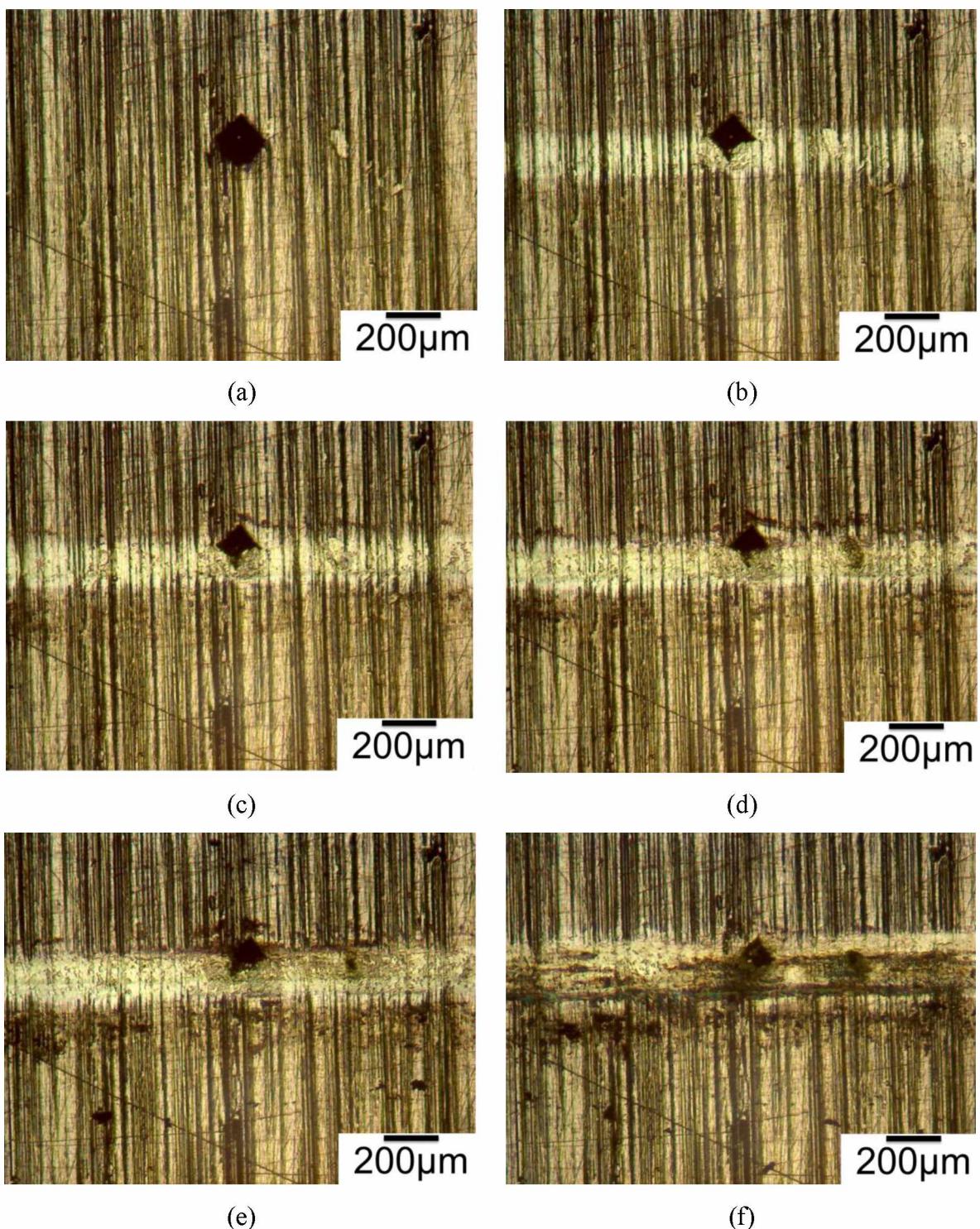


Figura 4.26. Evolução da trilha de desgaste com a presença de um defeito. Amostra de aço VC10 revestida com níquel químico, força normal 9,81 N, frequência 2 Hz, ao ar. Identação de 20 N. (a) ciclo 0, distância percorrida 0 m. (b) ciclo 1440, 28,8 m. (c) ciclo 2880, 57,6 m. (d) ciclo 4320, 86,4 m. (e) ciclo 5760, 115,2 m. (f) ciclo 7200, 144,0 m.

A inserção do defeito reforça a potencialidade do equipamento desenvolvido em capturar imagens em pontos específicos ao longo do ensaio proporcionando uma análise da evolução dos fenômenos relacionados à presença do defeito. A Figura 4.27 apresenta o mapa de triboscopia do ensaio com a presença do defeito prévio.

O defeito foi introduzido na posição central da trilha de desgaste, ou seja, posição 0 mm do gráfico 4.27. Esperava-se uma diminuição sistemática no valor do coeficiente de atrito nessa região nos instantes iniciais do ensaio devido à perda de contato provocada pelo defeito, como discutido por DOS SANTOS; COSTA e DE MELLO (2015). Entretanto, a Fig. 4.27c apresenta somente uma pequena diminuição do atrito nessa região nos primeiros 15 ciclos. Nesse caso, o defeito induzido não foi suficiente para gerar diferença no valor do coeficiente de atrito, pois o tamanho desse defeito é inferior à largura da marca de desgaste.

A Figura 4.26 apresenta a deformação plástica sistemática e preenchimento do defeito que ocorreu nos primeiros 3000 ciclos. É possível que a indentação tenha sido preenchida por material deformado nos instantes iniciais, mascarando a variação do coeficiente de atrito esperada.

Nessas condições de ensaio, o sistema de aquisição da célula de carga forneceu 359 pontos de medição de força ao longo de 20 mm percorrido (um ciclo). Nesse caso, considerando uma distribuição uniforme das informações obtidas ao longo da trilha de desgaste, há um espaçamento de aproximadamente 55,7 μm entre duas leituras sequenciais do valor de forças que compõem o gráfico de triboscopia. Essa análise define a sensibilidade da técnica de triboscopia, dado que qualquer defeito menor que 55,7 μm pode não ser percebido devido à taxa de aquisição adotada. A indentação inserida apresenta diagonal aproximada de 170 μm o que implica em pelo menos três leituras de força na posição de indentação. Os autores desse trabalho consideraram que a taxa de aquisição deveria ser pelo menos cinco vezes maior para observar o evento induzido na trilha de desgaste.

Os picos no coeficiente de atrito, indicado por setas roxas na Fig. 4.27a, são provenientes das pausas do movimento de deslizamento para captura de imagens. Esse processo aciona a técnica de controle do motor ao longo do número de ciclos.

O gráfico do coeficiente de atrito médio de cada ciclo está apresentado na Fig. 4.28.

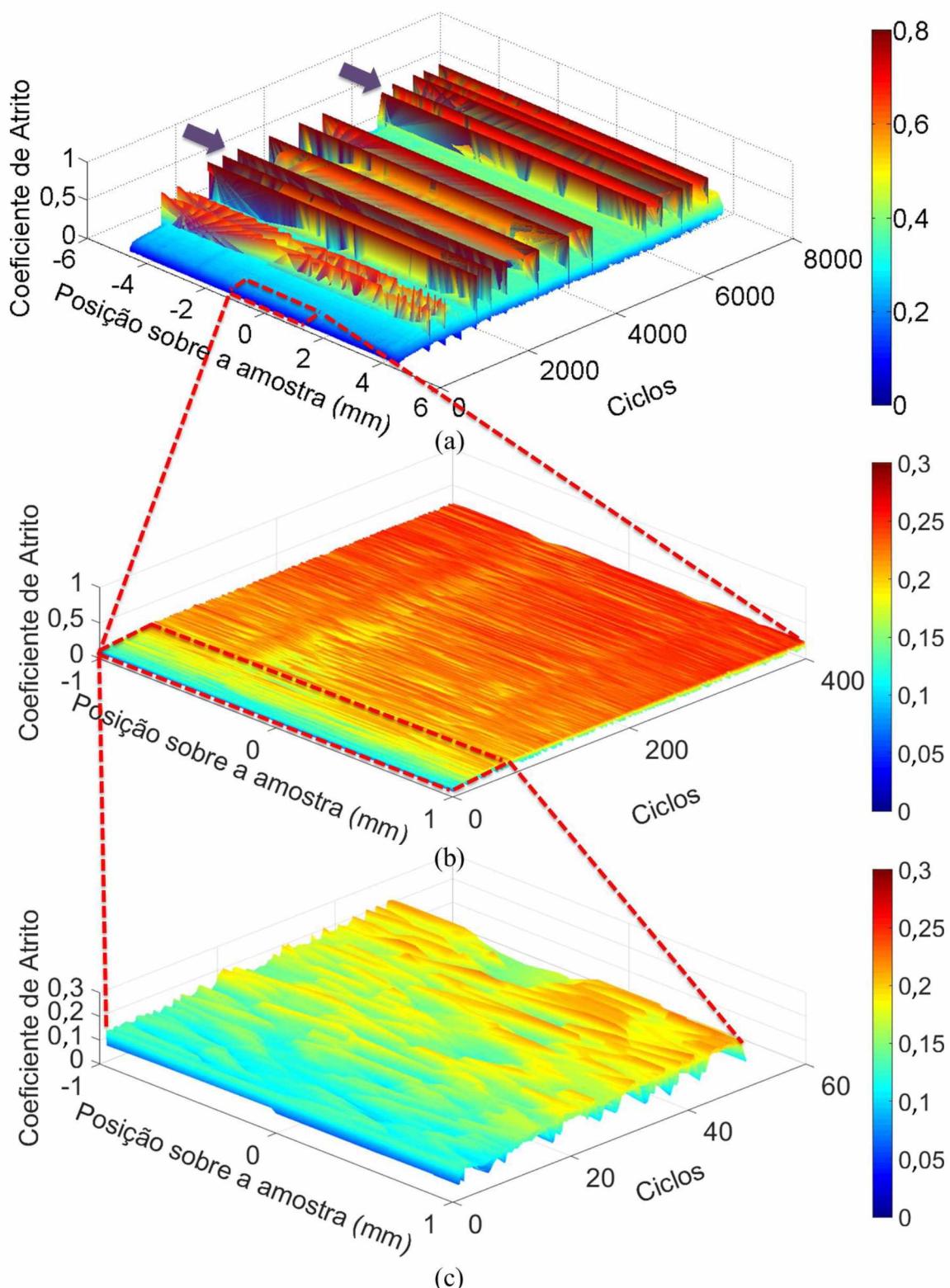


Figura 4.27. Mapa de triboscopia do ensaio na amostra com a presença do defeito. Aço VC10 revestido com níquel químico, força normal 9,81 N, frequência 2 Hz, ao ar. (a) Mapa de triboscopia completo. (b) Zoom na região entre -1 a 1 mm nos 400 primeiros ciclos. (c) Zoom na região entre -1 e 1 mm nos 60 primeiros ciclos.

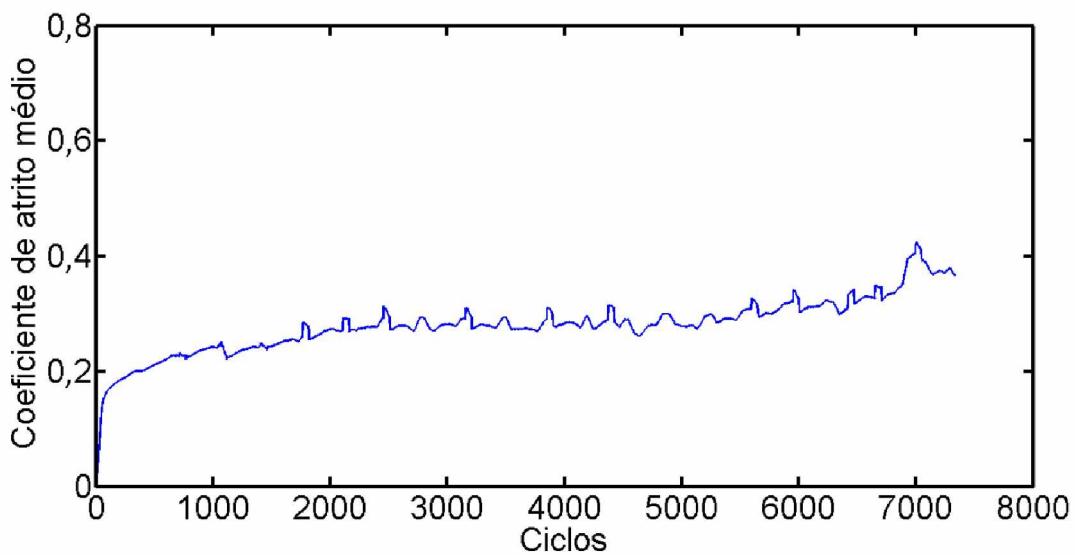


Figura 4.28. Coeficiente de atrito médio do ensaio na amostra do aço VC10 revestido com níquel químico, força normal 9,81 N, frequência 2 Hz, ao ar.

O aumento do número de partículas em conjunto com a deformação do material da superfície da trilha provocou um aumento brusco do coeficiente de atrito nos primeiros 1000 ciclos. Em comparação com os ensaios realizados com os mesmos parâmetros, porém, sem a captura de imagens ao longo do número de ciclos (ensaio M2, Fig. 4.23), o valor do coeficiente de atrito médio do regime permanente do ensaio de potencialidade foi inferior (0,31 comparado com 0,40). Isso se justifica visto que o tempo de deslizamento entre uma captura de imagem e outra é inferior ao tempo necessário para que o sistema entre em regime permanente. Ou seja, o tempo de cada etapa de deslizamento é inferior ao tempo que o sistema precisa para que o coeficiente de atrito entre em regime permanente.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou o projeto e desenvolvimento de um novo microtribômetro e sua validação. O objetivo aqui presente é viabilizar uma nova metodologia de análise do desgaste por deslizamento com movimento alternado, uma vez que considera a técnica de triboscopia em conjunto com a análise da sequência de imagens capturadas durante o ensaio. O desenvolvimento dessa nova metodologia apresentou as seguintes conclusões:

- Foram observadas deformações mecânicas na estrutura durante o ensaio devido ao movimento de deslizamento alternado que influenciaram diretamente no controle e calibração do equipamento como um todo. Um programa de controle foi desenvolvido de tal forma que corrija esse efeito do movimento de deslizamento.
- A faixa de operação do atuador piezelétrico ($28 \mu\text{m}$) é limitada para o ensaio proposto. A programação desenvolvida teve que atuar de forma simultânea no controle da mesa coordenada e controle do atuador piezelétrico, compensando a limitação da faixa de operação de tal atuador.
- A operacionalidade de aplicação de carga do sistema foi determinada através de comparações do tamanho das diagonais de identações feitas no microtribômetro e no microdurômetro. Nesse caso, o novo sistema gerou eventos com a mesma dimensão dos eventos gerados no microdurômetro para forças normais entre 0,3 e 13 N.
- Foi desenvolvido um programa para identificar o nivelamento da amostra. Esse programa foi utilizado para ajustar a fixação da mesma de forma que minimizasse a compensação da posição do contracorpo para controlar a força normal durante o ensaio. Essa técnica levou à variação da força normal menor que 4% ao longo do ensaio, sendo considerada uma variação satisfatória quando comparada com ensaios efetuados no tribômetro comercial Plint® que aplica força normal através de peso morto.
- A validação do novo microtribômetro foi realizada comparando o desgaste e o atrito com os resultados obtidos no tribômetro comercial Plint® em condições similares de ensaio. Os mecanismos de desgaste observados em todos os ensaios foram semelhantes,

predominando oxidação, formação de tribocamada e algumas regiões da marca de desgaste que possivelmente ocorreu adesão. A quantificação do volume desgastado foi estatisticamente igual quando comparado os resultados obtidos no microtribômetro e no tribômetro comercial Plint®. A partir dessa comparação o novo equipamento foi considerado validado nas condições testadas.

- A técnica triboscopia comprovou a semelhança entre os valores de coeficientes de atrito quando comparados os resultados obtidos nos equipamentos microtribômetro e tribômetro comercial Plint®. Esse estudo mostra o histórico do coeficiente de atrito ao longo da trilha de desgaste e reafirma a validação do equipamento microtribômetro. Os gráficos de triboscopia também evidenciam a perturbação da força normal decorrente do processo de compensação da faixa de operação limitada do atuador piezelétrico (PZT).

- A captura de imagens ao longo do ensaio permitiu analisar a evolução da trilha de desgaste e os mecanismos envolvidos, tais como: formação e falha da tribocamada, os mecanismos de desgaste envolvidos, o comportamento do material próximo ao defeito e em relação às marcas de retífica.

- A técnica de triboscopia apresentou limitações para a identificação de pequenos eventos na trilha de desgaste. Esse fato foi associado à resolução adotada para a aquisição das informações que compõem o mapa de triboscopia. Nesse caso, o sistema de medição de força e de posição forneceram 359 pontos por ciclo e com essa resolução o menor evento observável é de 55,7 µm.

- O microtribômetro construído apresentou um novo recurso de análise óptica quase “in situ” da superfície de desgaste. Comparações com a técnica triboscopia referentes à força de atrito e com informações obtidas de um tribômetro fabricado industrialmente em conjunto com as análises de volume desgastado foram suficientes para validação do equipamento.

CAPÍTULO VI

TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade desse trabalho sugerem-se as seguintes mudanças na metodologia proposta:

- Utilização de um atuador piezelétrico (PZT) com uma faixa de operação maior para que o controle da força normal seja mais efetivo, sem as oscilações causadas pelo controle da posição do conjunto mesa-atuador.
- Utilização da técnica de controle rápido FPGA (*Field Programmable Gate Array*) para garantir o controle da força normal com alta velocidade de resposta.
- Utilização de uma câmera térmica para observar a relação entre a temperatura e o coeficiente de atrito observados durante o deslizamento com movimento alternado.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTONOV, M.; HUSSAINOVA, I.; ADOBERG, E. Effect of loading system rigidity and inertia on friction coefficient and wear rate of ceramic–ceramic sliding contacts. Proceedings of the 13th international conference on metrology and properties of engineering surface. LEACH, R. e BLUNT, L. p. 151-155. 2011.
- ANTONOV, M.; HUSSAINOVA, I.; ADOBERG, E. Effect of loading system inertia on tribological behaviour of ceramic–ceramic, ceramic–metal and metal–metal dry sliding contacts. **Tribology International**, v. 65, p. 207-214. 2013. ISSN 0301-679X.
- ARANGO, C. C. V. **Transição no regime de desgaste por deslizamento dos aços: uma abordagem termodinâmica**. 2010. 231 f. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ASTM. **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. West Conshohocken, PA. ASTM G99-05. 2010.
- BELIN, M. Triboscopy: A new quantitative tool for microtribology. **Wear**, v. 168, n. 1, p. 7-12. 1993. ISSN 0043-1648.
- BELIN, M.; LOPEZ, J.; MARTIN, J. M. Triboscopy, a quantitative tool for the study of the wear of a coated material. **Surface and Coatings Technology**, v. 70, n. 1, p. 27-31. 1994. ISSN 0257-8972.
- BELIN, M.; MARTIN, J. M. Paper XI (i) Triboscopy, a New Approach to Study a Sliding Interface and the History of its Degradations. In: D. DOWSON, C. M. T. T. H. C. C. M. G. e DALMAZ, G. (Ed.). **Tribology Series**: Elsevier, v. 21, 1992a. p. 437-443. ISBN 0167-8922.
- BELIN, M.; MARTIN, J. M. Triboscopy, a new approach to surface degradations of thin films. **Wear**, v. 156, n. 1, p. 151-160. 1992b. ISSN 0043-1648.
- BERMÚDEZ, M. D.; IGLESIAS, P.; JIMÉNEZ, A. E.; MARTÍNEZ-NICOLÁS, G. Influence of sliding frequency on reciprocating wear of mold steel with different microstructures. **Wear**, v. 267, n. 11, p. 1784-1790. 2009. ISSN 0043-1648.
- BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**. CRC Press, 2001. ISBN 9780849384035.
- BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. Wiley, 2013. ISBN 9781118403228.

BISWAS, S. K. Some mechanisms of tribofilm formation in metal/metal and ceramic/metal sliding interactions. **Wear**, v. 245, n. 1–2, p. 178-189. 2000. ISSN 0043-1648.

BLAU, P. J. Mechanisms for transitional friction and wear behavior of sliding metals. **Wear**, v. 72, n. 1, p. 55-66. 1981. ISSN 0043-1648.

BLAU, P. J. On the nature of running-in. **Tribology International**, v. 38, n. 11–12, p. 1007-1012. 2005. ISSN 0301-679X.

BLAU, P. J. **Friction Science and Technology: From Concepts to Applications, Second Edition**. Taylor & Francis, 2008. ISBN 9781420054040.

BLAU, P. J. How common is the steady-state? The implications of wear transitions for materials selection and design. **Wear**, v. 332–333, p. 1120-1128. 2015. ISSN 0043-1648.

BRUZZONE, A. A. G.; COSTA, H. L.; LONARDO, P. M.; LUCCA, D. A. Advances in engineered surfaces for functional performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 2, p. 750-769. 2008. ISSN 0007-8506.

COSTA, H. L. **Modification of surface topography: manufacturing methods and applications**. 2005. 240 f. University of Cambridge.

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. The Behaviour of Textured Steel Surfaces under Plastic Deformation. **Journal of Materials Processing Technology**, 2006.

CULLITY, B. D. **Elements of X Ray Diffraction**. BiblioBazaar, 2011. ISBN 9781178511420.

DE MELLO, J. D. B.; HUTCHINGS, I. M. Effect of processing parameters on the surface durability of steam-oxidized sintered iron. **Wear**, v. 250, n. 1–12, p. 435-448, 2001. ISSN 0043-1648.

DOS SANTOS, M. B.; COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Potentially of triboscopy to monitor friction and wear. **Wear**, v. 332–333, p. 1134-1144, 2015. ISSN 0043-1648.

EEZZAT, F. M. H. The friction and wear of fresh and used engine oils during reciprocating sliding. **Wear**, v. 169, n. 2, p. 167-172. 1993. ISSN 0043-1648.

FONTAINE, J.; BELIN, M.; LE MOGNE, T.; GRILL, A. How to restore superlow friction of DLC: the healing effect of hydrogen gas. **Tribology International**, v. 37, n. 11–12, p. 869-877. 2004. ISSN 0301-679X.

FROMHOLD, A. T. **Theory of metal oxidation**. North Holland Pub. Co., 1975. p. ISBN 9780444109576.

GACHOT, C.; ROSENKRANZ, A.; HSU, S. M.; COSTA, H. L. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. **Wear**, v. 372–373, p. 21-41. 2017. ISSN 0043-1648.

GONÇALVES, A. C.; PADOVESE, L. R. **Vibration and oil analysis for monitoring problems related to water contamination in rolling bearing.** Conferência Brasileira Internacional de Tribologia. Rio de Janeiro 2010.

GONÇALVES JÚNIOR, J. L. **Avaliação tribológica de novas modificações superficiais para cilindros de laminação a frio.** 2016. 129 f. Universidade Federal de Uberlândia.

HAMILTON, D. B.; WALOWIT, J. A.; ALLEN, C. M. A Theory of Lubrication by Microirregularities. **Journal of Basic Engineering**, v. 88, n. 1, p. 177-185. 1966. ISSN 0098-2202.

HAYWARD, I. P.; FIELD, J. E. A computer-controlled friction measuring apparatus. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, v. 21, n. 8, p. 753. 1988. ISSN 0022-3735.

HORNG, J. H.; LIN, J. F.; LEE, K. Y. The Effect of Surface Irregularities on the Tribological Behavior of Steel Rollers Under Rolling-Sliding Contact. **Journal of Tribology**, v. 116, n. 2, p. 209-218. 1994. ISSN 0742-4787.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** Edward Arnold, 1992. ISBN 9780340561843.

JOST, H. P. **Lubrication (Tribology) Education and Research - A Report on the Presente Position and Industry's Needs.** Departamento de Educação e Ciência. Londres, p.79. 1966.

KAYABA, T.; KATO, K. The Adhesive Transfer of the Slip-Tongue and the Wedge. **A S L E Transactions**, v. 24, n. 2, p. 164-174. 1981. ISSN 0569-8197.

KIMURA, Y. Mechanisms of Wear - the Presente State of Our Understanding. **Transactions JSLE**, v. 28, p. 709-714. 1983.

MILAN, J. C. G.; CARVALHO, M. A.; XAVIER, R. R.; FRANCO, S. D.; DE MELLO, J. D. B. Effect of temperature, normal load and pre-oxidation on the sliding wear of multi-component ferrous alloys. **Wear**, v. 259, n. 1-6, p. 412-423. 2005. ISSN 0043-1648.

OLOFSSON, J.; GERTH, J.; NYBERG, H.; WIKLUND, U.; JACOBSON, S. On the influence from micro topography of PVD coatings on friction behaviour, material transfer and tribofilm formation. **Wear**, v. 271, n. 9-10, p. 2046-2057. 2011. ISSN 0043-1648.

PARREIRA, J. G.; GALLO, C. A.; COSTA, H. L. New advances on maskless electrochemical texturing (MECT) for tribological purposes. **Surface and Coatings Technology**, v. 212, p. 1-13. 2012. ISSN 0257-8972.

PETTERSSON, U.; JACOBSON, S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts. **Tribology International**, v. 36, n. 11, p. 857-864. 2003. ISSN 0301-679X.

QUINN, T. F. J. Oxidational wear. **Wear**, v. 18, n. 5, p. 413-419. 1971. ISSN 0043-1648.

SÁNCHEZ-LÓPEZ, J. C.; BELIN, M.; DONNET, C.; QUIRÓS, C.; ELIZALDE, E. Friction mechanisms of amorphous carbon nitride films under variable environments: a triboscopic

study. **Surface and Coatings Technology**, v. 160, n. 2–3, p. 138-144. 2002. ISSN 0257-8972.

SASSADA, T. **Tribology in the 1980s**. NASA Conf. Pub. p. 197-218. 1984.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Experimental Methods in Tribology**. Elsevier Science, 2004. ISBN 9780080472737.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 9780750678360.

STANLEY, H. M.; BOGY, D. B. Effect of surface conformity on friction. **Wear**, v. 168, n. 1, p. 105-108. 1993. ISSN 0043-1648.

STOTT, F. H. The role of oxidation in the wear of alloys. **Tribology International**, v. 31, n. 1–3, p. 61-71. 1998. ISSN 0301-679X.

WAHL, K. J.; BELIN, M.; SINGER, I. L. A triboscopic investigation of the wear and friction of MoS₂ in a reciprocating sliding contact. **Wear**, v. 214, n. 2, p. 212-220. 1998. ISSN 0043-1648.

WARD, R. A comparison of reciprocating and continuous sliding wear. **Wear**, v. 15, n. 6, p. 423-434. 1970. ISSN 0043-1648.

WENNERBERG, A.; ALBREKTSSON, T. Suggested Guidelines for the Topographic Evaluation of Implant Surfaces. **The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants**, v. 15, p. 331-344. 2000.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. Elsevier Science, 1987. p. ISBN 9780080875743.

ANEXO I - MÉTODO PARA FIXAÇÃO E POSICIONAMENTO DA AMOSTRA

Os procedimentos pré- ensaio estão apresentados na Fig. AI.1.

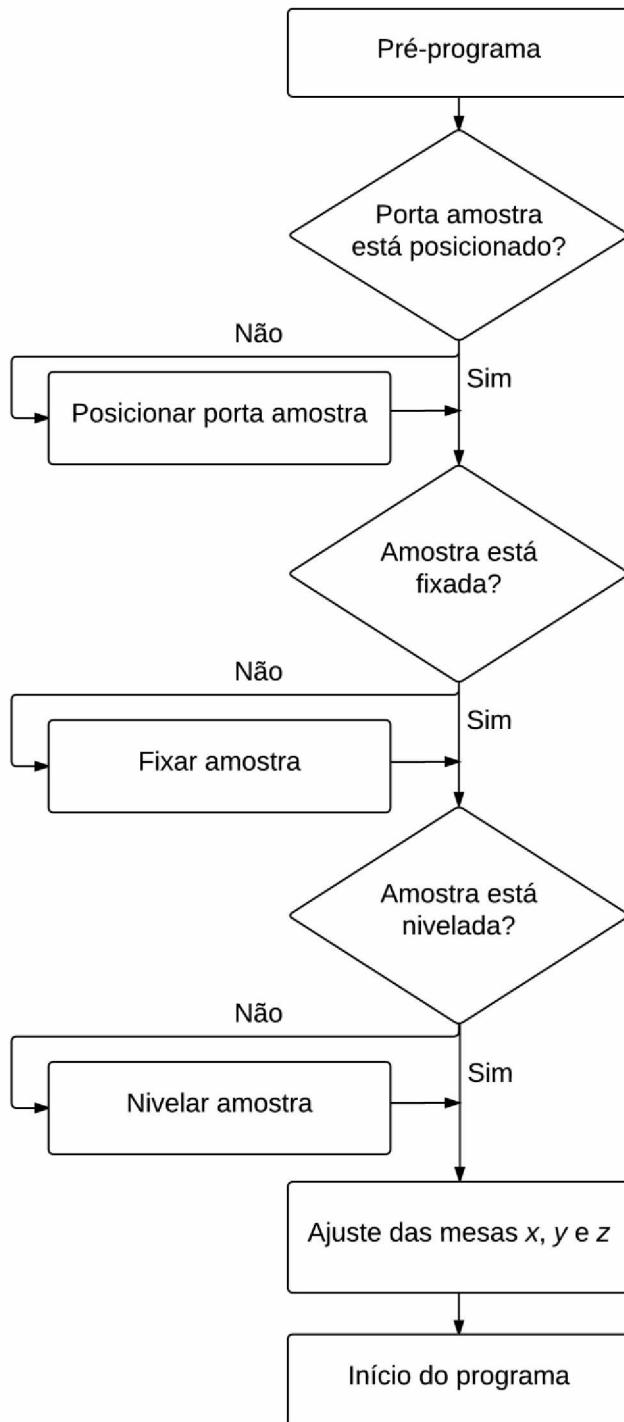


Figura AI.1. Fluxograma da preparação do ensaio.

Para ajuste do porta amostra, o usuário posiciona a mesa no ponto inicial desejado para o carregamento. Há um programa que auxilia posicionando a mesa nos pontos máximo, mínimo ou central lidos pelo LVDT, que correspondem ao ponto inicial, mediano e final da trilha do desgaste, respectivamente. Para isto, realiza-se a leitura do LVDT durante três ciclos do motor, obtém-se o menor e o maior valor adquirido e calcula-se a média. Nesse trabalho padronizou-se o carregamento no ponto central da trilha de desgaste.

A amostra é fixada no porta amostra utilizando parafusos e pinças especialmente desenvolvidos para este fim. Nesse processo de fixação deve ser observado se as pinças e parafusos não interferem no movimento inicial do ensaio de desgaste evitando qualquer colisão catastrófica.

Posteriormente, verifica-se o nivelamento da amostra através de um programa desenvolvido para este fim com o intuito de melhorar o controle da força normal uma vez que o PZT apresenta uma faixa de atuação restrita ($28 \mu\text{m}$). Fornecida a inclinação da amostra em μm por mm (conforme Fig. 3.16 do capítulo 3), verifica-se se esta é inferior a 70 % da faixa de atuação do PZT. Em caso afirmativo, considera-se a amostra como nivelada. Caso contrário, ajusta-se os parafusos utilizados na fixação de modo a diminuir a inclinação da amostra e repete-se a análise de nivelamento, repetindo o processo até obter-se o êxito.

O ajuste das mesas x , y e z utiliza o programa de posicionamento desenvolvido. Espera-se que o usuário posicione a amostra de forma que o penetrador esteja no ponto central desejado para a marca de desgaste (esse caso é para a configuração de posicionamento do porta amostra no ponto médio da marca de desgaste). Se o operador optar por iniciar o ensaios no ponto mínimo ou no ponto máximo, a amostra deve ser posicionada inicialmente de forma que o penetrador se encontre no extremo esquerdo ou extremo direito da marca de desgaste desejada, respectivamente. Além disso, a ponta do penetrador deve estar inicialmente próximo ($\sim 0,5 \text{ mm}$) à superfície da amostra para reduzir a duração do ensaio, diminuindo o tempo gasto na aproximação do penetrador que é feita com velocidade baixa por medida de segurança.

ANEXO II – FLUXOGRAMA DETALHADO DO PROGRAMA DE CONTROLE

O fluxograma detalhado da Fig. 4.2 do capítulo 4 está apresentado na Fig. AII.1.

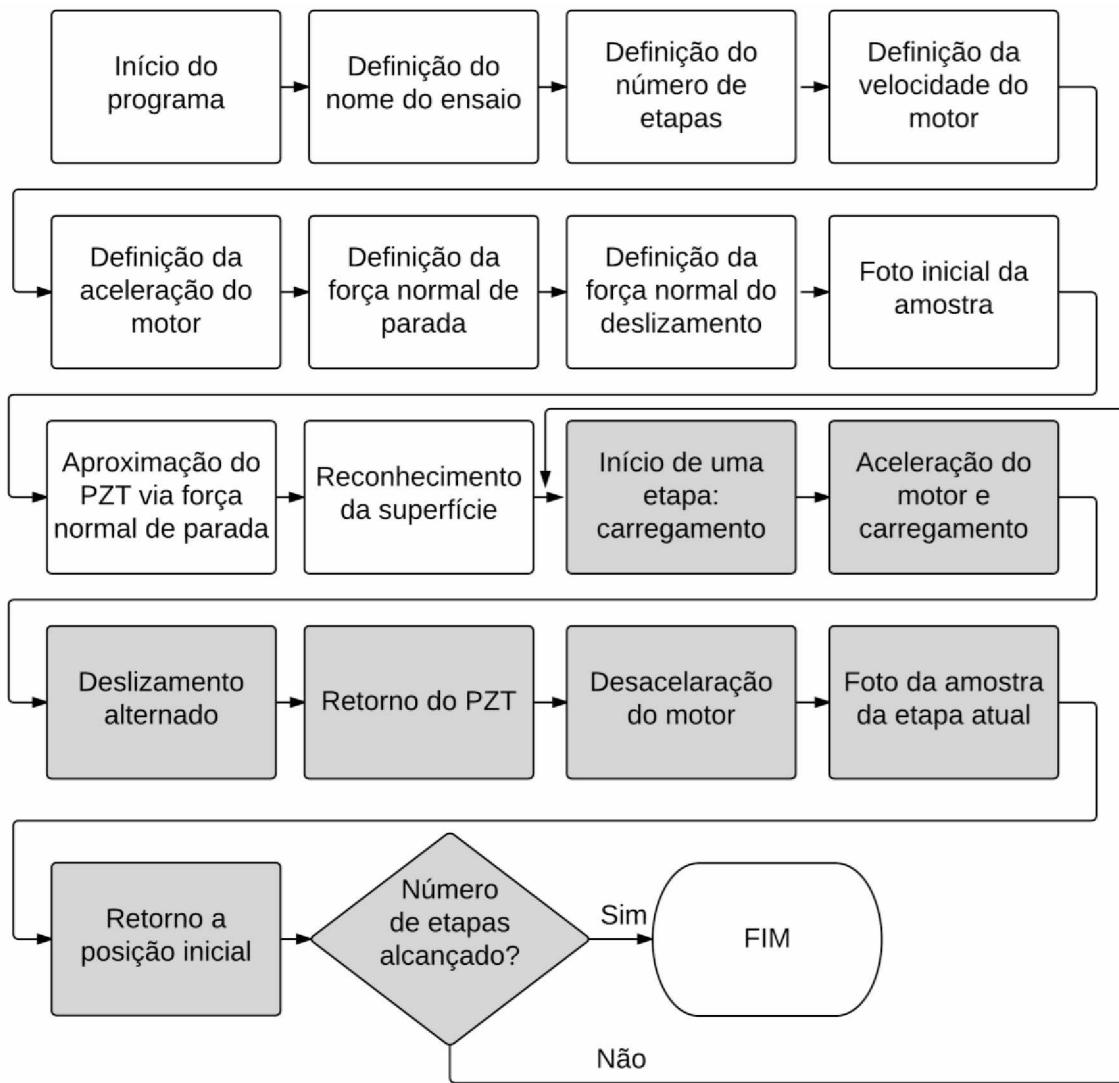


Figura AII.1. Fluxograma detalhado do programa de desgaste por deslizamento com movimento alternado.

A definição dos parâmetros é feita no programa principal, Fig. 4.3, no qual são inseridos os seguintes parâmetros de entrada: nome do ensaio, número de etapas, velocidade e aceleração do motor, força normal de parada, força normal do deslizamento e tempo de ensaio

que depende do número de ciclos ou da distância deslizada. As mesas x , y posicionam a amostra na lente do microscópio para registrar a foto inicial referente à posição central da trilha de desgaste. Nessa posição, o foco da imagem é ajustado manualmente. Ao retornar as mesas para a posição inicial do ensaio (centro da marca de desgaste), o programa de controle executa automaticamente o processo de aproximação do contracorpo utilizando o atuador piezelétrico (PZT) até que a força normal de parada seja atingida. Essa força normal de parada é utilizada somente no processo de reconhecimento da superfície.

Uma etapa é iniciada com o carregamento através do avanço da mesa z de forma que o contracorpo atue sobre a amostra até que a força normal lida na célula de carga seja equivalente à força normal definida para o ensaio (inserida pelo usuário). Simultaneamente ao processo de carregamento, ativa-se o motor e inicia-se o movimento alternado.

O movimento alternado prossegue até completar o número de ciclos de desgaste definido para cada etapa. Ao final do movimento de deslizamento e antes do período de desaceleração do motor, o atuador retorna bruscamente até o total descarregamento da força normal para evitar que o contato carregado com baixa velocidade altere as imagens dos mecanismos de desgastes gerados.

Finalizando uma etapa do ensaio, o programa executa a rotina de posicionamento e obtenção da imagem pelo microscópio óptico em uma posição específica da trilha de desgaste. Após a coleta da imagem, a amostra é novamente posicionada no ponto central da trilha de desgaste em relação ao penetrador. Caso o número de fases seja maior que 1, inicie-se um novo passo e um novo carregamento até que seja alcançado o número de etapas desejado.

ANEXO III – SISTEMA DE SEGURANÇA

Um sistema de segurança foi desenvolvido de forma que o PZT e a célula de carga não atuem em cargas acima da faixa de trabalho. Esse sistema opera em paralelo com o programa principal de forma que, em qualquer momento do ensaio, quando acontecerem forças superiores a 5 N na direção x ou y (força tangencial ou lateral), 90 N na direção z (força normal) e torque máximo de 400 N.m (em qualquer eixo), o programa é interrompido, o atuador retorna para a posição referente a tensão 0 e a mesa retrocede para o fim de curso superior, garantindo a segurança de todos os instrumentos. A Figura AIII.1 apresenta a tela de programação referente ao sistema de segurança do ensaio de deslizamento com movimento alternado.

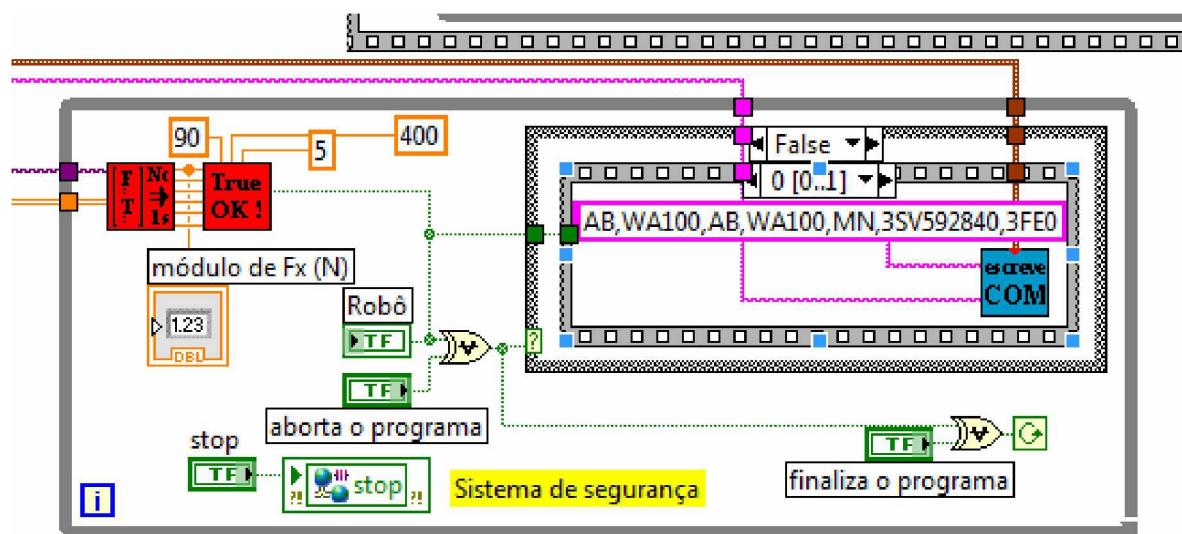


Figura AIII.1. Tela de programação do sistema de segurança.