

MARIO MARTINS DE OLIVEIRA JUNIOR

**EFEITO DE PARTÍCULAS DE DESGASTE NO  
COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE METAIS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

MARIO MARTINS DE OLIVEIRA JUNIOR

**EFEITO DE PARTÍCULAS DE DESGASTE NO COMPORTAMENTO  
TRIBOLÓGICO DE METAIS**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello

**Uberlândia – MG  
2018**

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

---

O48e  
2018      Oliveira Júnior, Mário Martins de, 1987-  
            Efeito de partículas de desgaste no comportamento tribológico de  
            metais / Mário Martins de Oliveira Júnior. - 2018.  
            117 f. : il.

            Orientador: José Daniel Biasoli de Mello.  
            Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
            de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
            Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.ufu.te.2018.37>  
            Inclui bibliografia.

            1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Metais - Fricção e desgastes -  
            Teses. 3. Desgaste mecânico - Teses. 4. Tribologia - Teses. I. Mello, José  
            Daniel Biasoli de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de  
            Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

---

CDU: 621



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA



**ALUNO:** Mário Martins de Oliveira Júnior

**NÚMERO DE MATRÍCULA:** 11323EMC007

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Materiais e Processos de Fabricação

**LINHA DE PESQUISA:** Tribologia e Materiais

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA:** NÍVEL DOUTORADO

**TÍTULO DA TESE:**

**“Efeito de Partículas de Desgaste no Comportamento Tribológico de Metais”**

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello

A Tese foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco 5S, Campus Santa Mônica, em 26 de janeiro de 2018, às 07:30 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME	ASSINATURA
Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello	UFU
Prof. Dr. Washington Martins da Silva Júnior	UFU
Profa. Dra. Sonia A. Goulart Oliveira	UFU
Prof. Dr. Júlio César Giubilei Milan	UDESC
Prof. Dr. Ricardo Diego Torres	PUC/PR

Uberlândia, 26 de janeiro de 2018



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, fonte da vida e certeza de que temos exatamente aquilo que é do nosso merecimento.

Ao professor José Daniel pela atenção dispensada, em especial, pela orientação pacienzosa, amiga e sempre convicta que realizaríamos, com sucesso, esse trabalho.

À minha amada esposa, Camila, de forma muito especial. Obrigado pelo companheirismo, dedicação, paciência e apoio incondicional. Obrigado por sempre estar ao meu lado e ter tido serenidade para compreender os momentos de crise e dificuldades, que sem ela, seriam muito mais difíceis de serem vencidos.

Aos meus pais, Mário e Marina, por terem sempre acreditado que os valores, os estudos, a afetividade são fundamentais para a formação humana e também, pela compreensão nos momentos de ausência. Às minhas irmãs Cíntia e Letícia, pelo incentivo. Ao meu cunhado e amigo, Vasco, pelo incentivo, força e amizade.

Aos meus sogros Gilvane e Maria Abadia, e também à minha cunhada Bruna, pela amizade, apoio e incentivo.

À professora Henara e ao professor Washington, pela ajuda e colaboração no enriquecimento deste trabalho.

Aos amigos, Miguel Angel e Wilian Labiapari, por toda a contribuição, incentivos e grande companheirismo na realização deste trabalho.

A toda a equipe do Laboratório de Tribologia e Materiais, que com a amizade e convivência, pude desfrutar de momentos de descontração e aprendizado mútuo.

Ao Laboratório Multiusuário do Instituto de Química e ao Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura pela disponibilidade no uso dos equipamentos.

Ao Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade de realizar este Curso.

A Capes e CNPq pelo apoio financeiro.

OLIVEIRA JÚNIOR, M. M. **Efeito de partículas de desgaste no comportamento tribológico de metais**. 2018. 117f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

### Resumo

A literatura é controversa quanto à influência de debris no comportamento tribológico. Alguns trabalhos têm mostrado que a presença deles é fundamental para a formação de tribocamadas protetoras, reduzindo o atrito e desgaste. Porém, outros trabalhos mostraram que esta presença poderia levar a aumentos no coeficiente de atrito e desgaste devido à energia gasta arrastando-os no contato. O objetivo deste trabalho é o estudo sistemático da influência de debris no comportamento tribológico de metais. Para isso, foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento recíproco com remoção de debris (via fluxo de ar comprimido), sem remoção e com adição de partículas de óxidos de ferro e alumina. Os pré-testes realizados com remoção de debris apresentaram reduções significativas no atrito e no desgaste, porém o contato estava com contaminações afeitas ao processo de remoção dos debris. Ensaios efetuados após o tratamento do ar comprimido apresentaram resultados completamente diferentes dos anteriores. Os ensaios com adição de partículas de óxidos de ferro apresentaram uma redução no atrito (15%) e no desgaste (95%) quando adicionadas as partículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (menos duras e maiores) sugerindo que a dureza relativa em relação aos corpos em contato foi o fator determinante nesta redução. Ensaios secos em alumínio com adição de partículas de alumina promoveram um aumento no atrito e no desgaste para as menores partículas. A adição controlada de partículas de alumina contribuiu para uma queda no desgaste dos contra corpos quando as maiores partículas foram adicionadas. A adição de partículas de alumina dispersas em água destilada contribuiu para uma queda significativa no atrito, para as maiores partículas. Estas contribuíram para a formação de tribocamadas na superfície das amostras, resultando em um ganho de massa. Foi proposto um novo índice, chamado Tamanho Relativo (TR), comparando os tamanhos dos debris e a topografia dos corpos em contato. Para valores de TR menores que 1, os debris eram muito pequenos para se envolverem no contato tribológico, não afetando o atrito e o desgaste. Para maiores valores de TR, os debris participariam ativamente no contato atuando na formação de tribocamadas protetoras, reduzindo o atrito e o desgaste do sistema. O aumento na concentração de partículas de alumina adicionadas ao contato contribuiu para um aumento no atrito e no desgaste. Portanto, é benéfica a presença de debris no contato, pois a adição de partículas contribuiu, na maioria dos casos, para a redução do atrito e desgaste.

---

Palavras Chave: *Debris. Atrito. Desgaste. Tribologia. Tamanho Relativo.*

OLIVEIRA JÚNIOR, M. M. **Effect of wear debris on tribological behavior of metals.** 2018. 117f. PhD Thesis. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

### **Abstract**

The literature is controversial in relation to the influence of wear debris on tribological behaviour. Some works have shown that the presence of debris is fundamental to the formation of a protective tribolayer, thus reducing friction and wear, whereas others showed that the presence of wear debris could contribute to increase friction coefficient due to the energy spent dragging them into the contact. This work aims to study the influence of wear debris on tribological behaviour of metals. Tests under reciprocating wear sliding contact with debris removal (by compressed air flow), without removal and with the addition of iron oxides and alumina particles were performed. The pre-tests with debris removal showed a significant reduction in friction and wear, however, the contact was contaminated by the debris removal system. Testes performed after the compressed air treatment showed results completely different. The tests with the addition of iron oxide particles resulted in friction (15%) and wear (95%) reduction when added the  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  particles (larger and softer) suggesting that their relative hardness in relation to the materials in contact was the main factor for this reduction. Dry tests with addition of alumina particles on aluminum samples resulted in an increase in friction and wear when the small particles were added. The controlled addition of alumina particles contributed to a decrease in the counter bodies wear rate when the larger particles were added. The addition of alumina particles dispersed in distilled water contributed to a significant reduction in friction when the larger particles were added. These large particles intensified significantly the formation of a tribolayer on the sample surface, which resulted in a gain of mass. It was proposed a new index, called Relative Size (RS), comparing the sizes of the wear debris and the specimen surface roughness. For RS values less than 1, the wear debris was too small to get involved in the tribological contact and they did not affect friction and wear. For larger RS values, the particles participated actively in the formation of a protective tribolayer, reducing friction and the system wear. The increase in the concentration of alumina particles added in the contact contributed to an increase in friction and wear. Therefore, the presence of debris in contact is beneficial since the addition of particles contributed, in the majority of cases, to reductions on friction and wear.

---

Keywords: *Debris. Friction. Wear. Tribology. Relative Size.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra (OLIVEIRA JR et al., 2017).	6
Figura 2.2: Densidade de Partículas em função do tempo de ensaio (adaptado de SHERRINGTON; HAYHURST, 2001).	7
Figura 2.3: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio (adaptado de SHERRINGTON; HAYHURST, 2001).	7
Figura 2.4: Evolução do coeficiente de atrito em função do aumento da densidade de debris (adaptado de SHERRINGTON; HAYHURST, 2001).	8
Figura 2.5: Perfis transversais das marcas de desgaste. (a) Amostra C; (b) Amostra P (OLIVEIRA JR et al., 2017).	9
Figura 2.6: Aspecto típico da distribuição das partículas de desgaste. (a) Liga P. (b) Liga C (OLIVEIRA JR et al., 2017).	9
Figura 2.7: Evolução do coeficiente de atrito (VIÁFARA; SINATORA, 2011).	10
Figura 2.8: Mecanismos de desgaste. (a) Com remoção de debris (240m); (d) Sem remoção de debris (252 m); (b, c) Imagens obtidas por MEV para os ensaios sem remoção; (e, f) Imagens obtidas por MEV para os ensaios com remoção (adaptado de VIÁFARA; SINATORA, 2011).	11
Figura 2.9: Superfícies dos pinos de bronze desgastados. (a) Teste com remoção de debris. (b) Teste sem remoção. Ampliação de 48 vezes. (Adaptado de SHEASBY; VANDERGEEST, 1981).	11
Figura 2.10: Taxa de desgaste para as condições ensaiadas com e sem remoção (Adaptado de LEHEUP; PENDLEBURY, 1991).	12
Figura 2.11: Esquema de camadas superficiais formadas através de interações físico-químicas (Adaptado de BHUSHAN, 2013).	13

Figura 2.12: Diagramas esquemáticos da adsorção física, química e reação química (BUCKLEY, 1981).....	14
Figura 2.13: Espectro de Raios-X de debris coletados (STRAFFELINI; TRABUCCO; MOLINARI, 2001).....	15
Figura 2.14: Compilado de valores das resistividades elétricas para diversos materiais destacando as faixas dos valores da resistividade da magnetita, hematita e wustita encontrados na literatura e compilados por (BOZZI, 2004). ....	16
Figura 2.15: (a) Aparato utilizado por Kato (Adaptado de KATO, 2003). (b) Esquema proposto por Straffellini, Trabucco e Molinari (Adaptado de STRAFFELINI; TRABUCCO; MOLINARI, 2001).....	17
Figura 2.16: Evolução do coeficiente de atrito para diferentes tamanhos de partículas. (a) Partículas de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . (b) Partículas de Fe (KATO, 2003). ....	18
Figura 2.17: Evolução da taxa de desgaste para diferentes tamanhos de partículas. (a) Partículas de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . (b) Partículas de Fe (KATO, 2003). ....	19
Figura 2.18: Coeficiente de atrito em função da distância deslizada (RODRIGUES et al., 2015).....	20
Figura 2.19: Mapas EDS do pino usado nos dos ensaios com adição de cobre com 20 n. (a) Imagem de MEV via elétrons secundários. (b), (c) e (d) Mapas EDS (RODRIGUES et al., 2015).....	21
Figura 2.20: Seção transversal da marca de desgaste dos pinos. (a) Sem adição; (b) (c) e (d) Adição de partículas de cobre com 400 $\mu\text{m}$ , 20 $\mu\text{m}$ e 50 nm respectivamente (Adaptado de RODRIGUES et al., 2015). ....	22
Figura 2.21: Seção transversal das marcas de desgaste dos discos. (a) Sem adição; (b) (c) e (d) Adição de partículas de cobre com 400 $\mu\text{m}$ , 20 $\mu\text{m}$ e 50 nm respectivamente (Adaptado de RODRIGUES et al., 2016). ....	23
Figura 2.22: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo. (a) Sem adição. (b) Com adição (adaptado de YUAN et al., 2005).....	24

Figura 2.23: Mecanismos de desgaste das esferas e discos ensaiados. (a) e (b) sem adição. (c) e (d) com adição de pó de ferro (adaptado de YUAN et al., 2005).	25
Figura 2.24: Análise dos debrís coletados. (a) Imagem de MEV via elétrons secundários. (b) Espectro EDS (KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).	26
Figura 2.25: Análise XPS dos debrís coletados com 30% de umidade e de pós de alumínio com alta pureza (Adaptado de KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).	27
Figura 2.26: Análise dos debrís via MEV e EDS dos debrís coletados dos ensaios com 30% de umidade. (a) Antes do recozimento. (b) Após o recozimento a 260 °C por 5 horas no vácuo (Adaptado de KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).	28
Figura 2.27: Análise dos debrís via termogravimetria (Adaptado de KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).	28
Figura 3.1: Testes tribológicos. (a) Modelo esquemático do teste. (b) Exemplo de uma imagem triboscópica 3D.	32
Figura 3.2: Representação gráfica do parâmetro $S_{pk}$ (TAYLOR HOBSON, 2000).	34
Figura 3.3: Modelo esquemático de uma calota esférica. Onde: “h” é a altura da calota esférica; “a” é o raio da calota esférica e “r” é o raio da esfera.	35
Figura 3.4: Esquema ilustrativo do sistema de remoção dos debrís.	36
Figura 3.5: Fluxograma dos ensaios realizados nos aços ferramenta.	37
Figura 3.6: Fluxograma dos ensaios realizados em alumínio comercialmente puro.	38
Figura 4.1: Microestrutura do contra corpo.	39
Figura 4.2: Aço ferramenta usado nos ensaios após o tratamento do ar comprimido.	40
Figura 4.3: Mapa topográfico típico das amostras de aço ferramenta.	41
Figura 4.4: Mapa topográfico do contra corpo.	41
Figura 4.5: Parâmetros topográficos dos materiais usados ensaios.	42

Figura 4.6: Evolução do coeficiente de atrito. (a) Referência, (b) Remoção a 4bar e (c) Remoção a 8bar. ....	43
Figura 4.7: Coeficiente de atrito médio por ciclo. ....	43
Figura 4.8: Comparativo entre as marcas de desgaste para os ensaios interrompidos em 1200 ciclos. ....	44
Figura 4.9: Coeficiente de atrito médio no regime permanente. ....	45
Figura 4.10: Perfis transversais das marcas de desgaste. (a) Referência, (b) Remoção a 4bar e (c) Remoção a 8bar. ....	46
Figura 4.11: Potencial de contato. (a) Referência, (b) Remoção a 4bar e (c) Remoção a 8bar. ....	46
Figura 4.12: Análise via MEV-EDS típica para a amostra de referência. (a) Imagem por elétrons secundários (b) Imagem por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2. ....	47
Figura 4.13: Análise via MEV-EDS – Típico para Remoção 4bar e 8bar. (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2. ....	48
Figura 4.14: Distribuição granulométrica. (a) $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , (b) $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Adaptado de (DA SILVA; BINDER; DE MELLO, 2005). ....	50
Figura 4.15: Evolução do coeficiente de atrito. (a) Referência, (b) $\text{Fe}_2\text{O}_3$ e (c) $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . ....	51
Figura 4.16: Coeficiente de atrito médio por ciclo para ensaios com adição de partículas. ....	51
Figura 4.17: Coeficiente de atrito médio total para ensaios com adição de partículas. ....	52
Figura 4.18: Evolução do potencial de contato. (a) Referência, (b) $\text{Fe}_2\text{O}_3$ e (c) $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . ....	53
Figura 4.19: Taxa de desgaste do sistema. ....	53
Figura 4.20: Imagens de MEV das marcas de desgaste das amostras. ....	54

Figura 4.21: Marca de desgaste da amostra ensaiada com $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . (a) Imagem por elétrons secundários (b) Imagem por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2. ....	55
Figura 4.22: Marca de desgaste típica para amostra ensaiada com $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2. ....	56
Figura 4.23: Imagens de MEV das marcas de desgaste dos contra corpos. ....	58
Figura 4.24: Detalhe da marca de desgaste do contra corpo do ensaio referência. (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Espectro EDS para a área 1, (d) Espectro EDS para a área 2. ....	59
Figura 4.25: Análise via MEV-EDS para os contra corpos ensaiados com Adição. (a) e (b) Imagens por elétrons secundários e retroespalhados para $\text{Fe}_2\text{O}_3$ respectivamente (c) e (d) Imagens por elétrons secundários e retroespalhados para $\text{Fe}_3\text{O}_4$ respectivamente (e) Espectro EDS típico para as áreas “1”, (f) Espectro EDS típico para as áreas “2”. ....	60
Figura 4.26: Mapa topográfico típico das amostras de Alumínio. ....	62
Figura 4.27: Parâmetros topográficos das amostras de Alumínio polidas. ....	62
Figura 4.28: Evolução do coeficiente de atrito. (a) RS, (b) 0,05 $\mu\text{m}$ , (c) 10 $\mu\text{m}$ , (d) Remoção. ....	63
Figura 4.29: Coeficiente de atrito médio por ciclo. ....	63
Figura 4.30: Coeficiente de atrito médio no regime permanente. ....	64
Figura 4.31: Taxa de desgaste do sistema. ....	65
Figura 4.32: Imagens de MEV das marcas de desgaste das amostras. ....	66
Figura 4.33: Análise das marcas de desgaste via MEV-EDS – Típico para RS e Remoção. (a) e (b) Imagens de MEV por elétrons secundários e retroespalhados respectivamente. (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2. ....	67



Figura 4.34: Análise das tribocamadas para ensaios com adição de debris com 0,05 $\mu\text{m}$ . (a) e (b) Imagens de MEV por elétrons secundários e retroespalhados respectivamente. (c) e (d) Espectros EDS para as áreas 1 e 2 respectivamente. ....	67
Figura 4.35: Análise de uma marca de desgaste para os ensaios com adição de partículas de 10 $\mu\text{m}$ . (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2, (e) Análise EDS para o ponto 3. ....	68
Figura 4.36: Imagens de MEV das marcas de desgaste típicas para os contra corpos. ....	69
Figura 4.37: Detalhe típico das superfícies desgastadas dos ensaios RS e Remoção. (a) e (b) Imagem de MEV por elétrons Secundários e Retroespalhados respectivamente. (c) e (d) Espectros EDS para as áreas 1 e 2 respectivamente. ....	70
Figura 4.38: Detalhe típico da borda da marca de desgaste dos contra corpos dos ensaios com adição. (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2. ....	71
Figura 4.39: Evolução do coeficiente de atrito. (a) RS, (b) 20 nm, (c) 3 $\mu\text{m}$ . ....	72
Figura 4.40: Coeficiente de atrito médio por ciclo. ....	72
Figura 4.41: Coeficiente de atrito médio no regime permanente. ....	73
Figura 4.42: Taxa de desgaste do sistema. ....	73
Figura 4.43: Imagens de MEV das marcas de desgaste das amostras. ....	74
Figura 4.44: Detalhe de uma marca de desgaste típica para adição controlada. (a) e (b) Imagens de MEV via elétrons secundários e retroespalhados. (c) e (d) Espectros EDS para as áreas 1 e 2 respectivamente. ....	75
Figura 4.45: Imagens de MEV das marcas de desgaste dos contra corpos. ....	76
Figura 4.46: Detalhe típico do interior da marca de desgaste dos contra corpos ensaiados com adição controlada de partículas com 3 $\mu\text{m}$ . (a) e (b) Imagens de MEV por elétrons secundários e retroespalhados. (c) Análise EDS para a área 1. (d) Análise EDS para a área 2. ....	77

- Figura 4.47: Detalhe típico do interior da marca de desgaste dos contra corpos ensaiados com adição de partículas com 10 $\mu$ m adicionadas em excesso. (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2. .... 77
- Figura 4.48: Imagens de MEV e análise EDS para os debrís coletados nos ensaios submersos. (a) e (b) Imagens de MEV por elétrons secundários. (c) análise via EDS para a área 1. .... 79
- Figura 4.49: Distribuição granulométrica dos debrís coletados nos ensaios submersos. (a) Distribuição granulométrica cumulativa (em volume); (b) Distribuição da Razão de Aspecto. .... 80
- Figura 4.50: Imagens de MEV via elétrons secundários das partículas adicionadas. (a) 0,05  $\mu$ m, (b) 0,1  $\mu$ m, (c) 1  $\mu$ m, (d) 10  $\mu$ m. .... 80
- Figura 4.51: Evolução do coeficiente de atrito. (a) RAD, (b) 0,1  $\mu$ m, (c) 1  $\mu$ m, (d) 10  $\mu$ m. .... 81
- Figura 4.52: Evolução do coeficiente de atrito em função do número de ciclos. .... 82
- Figura 4.53: Valores médios do coeficiente de atrito no regime permanente. .... 82
- Figura 4.54: Taxa de desgaste do sistema. .... 83
- Figura 4.55: Projeções axonométricas das marcas de desgaste das amostras, via interferometria laser. a) RAD; b) 0,1  $\mu$ m; c) 1  $\mu$ m; d) 10  $\mu$ m. .... 84
- Figura 4.56: Imagens de MEV das marcas de desgaste nas amostras. Acima imagens via eletrons secundários e abaixo via elétrons retroespalhados. (a) e (e) RAD; (b) e (f) 0,1  $\mu$ m; (c) e (g) 1  $\mu$ m; (d) e (h) 10  $\mu$ m. .... 85
- Figura 4.57: Detalhe da marca de desgaste nas amostras dos ensaios RAD: (a) Imagem de MEV por elétrons secundários. (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados. (c) Análise via EDS para a região 1. (d) Análise via EDS para a região 2. (e) Análise via EDS para a região 3. .... 85
- Figura 4.58: Detalhe da marca de desgaste nas amostras ensaidas com 0,1  $\mu$ m: (a) Imagem de MEV por elétrons secundários. (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados. (c) Análise via EDS para a região 1. (d) Análise via EDS para a região 2. .... 86

Figura 4.59: Detalhe da marca de desgaste nas amostras ensaiadas com 1 $\mu\text{m}$ : (a) Imagem de MEV por elétrons secundários. (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados. (c) Detalhe da região 1. (d) Detalhe da região 2. (e) Análise via EDS para a região 1. (f) Análise via EDS para a região 2.....	87
Figura 4.60: Detalhe da marca de desgaste nas amostras ensaiadas com 10 $\mu\text{m}$ : (a) Imagem de MEV por elétrons secundários. (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados. (c) Detalhe com maior ampliação de uma região contendo algumas partículas isoladas. (d) Análise via EDS para a região 1. (e) Análise via EDS para a região 2. ....	88
Figura 4.61: Imagens de MEV das marcas de desgaste dos construtores. (a) e (b) RAD; (c) e (d) 0,1 $\mu\text{m}$ ; (e) e (f) 1 $\mu\text{m}$ ; (g) e (h) 10 $\mu\text{m}$ .....	90
Figura 4.62: Esquema ilustrativo de um contato com debris. ....	92
Figura 4.63: Relação entre o Índice de tamanho relativo ( $TR$ ), coeficiente de atrito e as taxas de desgaste dos materiais testados.....	93
Figura 4.64: Evolução do coeficiente de atrito. (a) RAD, (b) 2%, (c) 10%, (d) 40%. ....	94
Figura 4.65: Evolução do coeficiente de atrito médio por ciclo.....	95
Figura 4.66: Coeficiente de atrito médio no regime permanente. ....	95
Figura 4.67: Imagens geradas via perfilometria 3D. (a) RAD. (b) 2%. (c) 10%. (d) 40%.....	96
Figura 4.68: Taxa de Desgaste do Sistema.....	97
Figura 4.69: Comparativo dos mecanismos de desgaste para as diferentes concentrações. ....	98
Figura 4.70: Detalhe da tribocamada formada nos ensaios com 40%. (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Espectro EDS para a área 1, (d) Espectro EDS para a área 2. ....	99
Figura 4.71: Imagens de MEV das marcas de desgaste dos contra corpos. (a) 2%; (b) 10%; (c) 40%. ....	100
Figura 4.72: Detalhe das marcas de desgaste dos contra corpos. (a) 2%; (b) 10%; (c) 40%. ....	100

Figura AI.1: Microestrutura típica do aço ferramenta utilizado nos pré-testes. (a) Aspecto geral. (b) Detalhe. ....	111
Figura AI.2: Mapa topográfico típico das amostras de aço ferramenta.....	112
Figura AI.3: Parâmetros topográficos dos materiais usados nos pré-testes. ....	112
Figura AI.4: Evolução do coeficiente de atrito. (a) Sem remoção de debris. (b) Com remoção de debris.....	113
Figura AI.5: Evolução do coeficiente de atrito médio por ciclo. ....	113
Figura AI.6: Evolução do potencial de contato. (a) Sem remoção de debris. (b) Com remoção de debris.....	114
Figura AI.7: Perfis transversais das marcas de desgaste. (a) Sem remoção de debris. (b) Com remoção de debris.....	114
Figura AI.8: Evolução do coeficiente de atrito. (a) Mapa triboscópico 3D (b) Coeficiente de atrito médio por ciclo.....	115
Figura AI.9: Análise via MEV-EDS de uma marca de desgaste típica dos ensaios realizados sem remoção de debris. (a) Imagem por elétrons Secundários (b) Imagem por elétrons retroespalhados, (c) Espectro EDS para a área 1, (d) Espectro EDS para a área 2. ....	116
Figura AI.10: Análise via MEV-EDS dos ensaios efetuados com remoção de debris. (a) Imagem por elétrons Secundários (b) Imagem por elétrons retroespalhados, (c) Espectro EDS para a área 1, (d) Espectro EDS para a área 2, (e) Espectro EDS para a área 3. ....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição química do aço AISI 52100 (porcentagem em peso). .....	30
Tabela 4.1- Composição química do aço ferramenta. ....	40
Tabela 4.2 Valores de dureza para as partículas adicionadas e corpos em contato.....	57
Tabela 4.3: Composição química das amostras de alumínio (porcentagem em peso). ....	61
Tabela AI.1: Composição química do aço ferramenta utilizado nos pré-testes.. ....	111

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$ : coeficiente de atrito

AISI: “*American Iron and Steel Institute*”

ANOVA: análise de variância

EDS: espectroscopia de energia dispersiva

eV: elétron-volt

$H_A$ : dureza do abrasivo

$H_M$ : dureza do material

HV: dureza Vickers

HRC: dureza Rockwell C

LVDT: “*Linear Variable Differential Transformer*”

MEV: microscópio eletrônico de varredura

RMS: “*root mean square*”.

$S_{bi}$ : capacidade de suporte mecânico da superfície

$S_{dq}$ : inclinação média das irregularidades

$S_{pk}$ : altura dos picos da superfície

$S_q$ : rugosidade superficial quadrática média.

XPS: espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios-X

## SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução.....	1
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica .....	4
Capítulo 3 - Metodologia.....	30
3.1 - Materiais .....	30
3.2 - Métodos .....	31
Capítulo 4 - Resultados e Discussão .....	39
4.1 - Efeito da remoção de debris e adição de partículas de óxidos de ferro em ensaios com aço ferramenta.....	39
4.2 - Efeito da remoção de debris e adição de partículas de alumina em ensaios com alumínio. ....	61
Capítulo 5 - Conclusões.....	101
Capítulo 6 - Trabalhos Futuros .....	103
Capítulo 7 - Referências Bibliográficas .....	104
APÊNDICE I – Pré-testes com remoção de debris em aço ferramenta.....	111

# **CAPÍTULO I**

## **Introdução**

O deslizamento de duas superfícies leva à formação de debris (partículas de desgaste), onde alguns deles são removidos do contato após sua formação, mas alguns permanecem no contato e podem sofrer transformações, modificando as tensões no contato e contribuindo na formação de tribocamadas protetoras (FISCHER et al., 2000). Por esta razão, a formação e o papel dos debris no comportamento tribológico de superfícies em contato tem sido estudado por muitos anos (COCKS, 1958).

Blau (BLAU, 1981) distingue os debris entre dois tipos: os debris passivos, em tamanhos maiores, que são removidos da zona de contato imediatamente após sua gênese; e os debris ativos, que possuem um envolvimento maior no contato tribológico e são substancialmente menores. Uma vez que os debris são formados, eles podem sofrer uma maior deformação, fragmentação e cominuição (JIANG; STOTT; STACK, 1998), de modo que as partículas maiores são formadas inicialmente e as partículas menores são geradas posteriormente (JIANG; STOTT; STACK, 1998; KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).

No entanto, a literatura é controversa quanto à influência de partículas de desgaste ou debris no comportamento tribológico, sendo atribuídos efeitos positivos e negativos com relação a esta influência. Como exemplos de efeitos prejudiciais, em sistemas lubrificados, a contaminação é geralmente tomada como indesejada (SANTANAM, 1983; HAMILTON; SAYLES; IOANNIDES, 1998; YUAN et al., 2005). A presença dos debris pode contribuir para a poluição dos canais de lubrificação quando misturados ao lubrificante, podendo até causar entupimentos, afetando a produção de peças na manufatura, como por exemplo, a estética das chapas laminadas (LABIAPARI et al., 2015).

Em contatos por deslizamento secos, efeitos negativos da presença dos debris no comportamento tribológico também foram reportados. Em testes de deslizamento com aços a remoção intermitente dos debris resultou em uma queda do coeficiente de atrito, sugerindo então, que a ação abrasiva destes estaria então contribuindo para o aumento do atrito (VIÁFARA; SINATORA, 2011).



Este efeito também foi observado por Sheasby e Vandergeest (SHEASBY; VANDERGEEST, 1981), que removeram os debris do contato com o auxílio de escovas. Os autores observaram uma redução do coeficiente de atrito em duas vezes acompanhada de uma redução da taxa de desgaste em 200 vezes, quando removidos os debris. Reduções no coeficiente de atrito também foram reportadas por (USMANI; SAMPATH, 1999).

Além do efeito da remoção dos debris do contato tribológico, a literatura também apresenta trabalhos sobre o efeito da adição de partículas no contato, pois como estudado por diversos autores, os debris são fundamentais na formação de tribocamadas.

A literatura ainda mostra que as tribocamadas podem se formar de diferentes formas, dependendo do tipo de interação entre os debris, a superfície em contato e também o ambiente em que estão inseridos. Em contatos com pinos com geometrias curvas, por exemplo, contatos do tipo esfera-plano, a recirculação dos debris é muito mais intensa que em contatos plano-plano, onde os debris expulsos do contato dificilmente voltariam a participar na formação de tribocamadas protetoras (BARRAU et al., 2007). Esta recirculação dos debris no contato e também retenção do material transferido, são necessárias para a formação de tribocamadas protetoras (HARRIS et al., 2015).

O efeito da adição de partículas de óxido de ferro em discos de aço foi estudado por Kato (KATO, 2003), onde os ensaios com adição de partículas promoveram quedas no coeficiente de atrito e desgaste, que segundo o autor, foram promovidas por uma transição no regime de desgaste de severo para suave, devido à formação de tribocamadas protetoras, quando adicionadas pequenas partículas de óxidos de ferro. Outros autores também estudaram o efeito da presença de particulados na formação de camadas protetoras (IWABUCHI; KUBOSAWA; HORI, 1990; JIANG; STOTT; STACK, 1998). Reduções no atrito e desgaste quando adicionados pó de ferro em contatos lubrificados com óleo também foram reportadas por (YUAN et al., 2005).

No caso do deslizamento de alumínio, os debris foram estudados e caracterizados em termos da estrutura e composição química, tanto via experimental quanto por simulações computacionais, por Kim, Windl e Rigney (KIM; WINDL; RIGNEY, 2007). Os autores concluíram que os debris não são meramente compostos por óxidos de alumina, mas uma solução sólida parte óxido e parte hidróxido de alumínio, onde os debris coletados de ensaios com 95% de umidade relativa apresentaram uma maior quantidade de água retida nos debris (aproximadamente 25% em peso).

Como comentado a literatura é controversa quanto à influência da presença dos debris no comportamento tribológico. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é o estudo sistemático

da influência de debris no comportamento tribológico de metais. Para isso, foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento recíproco com remoção de debris (via fluxo de ar comprimido), sem remoção e com adição de partículas de óxidos de ferro e alumina.

Inicialmente foram feitos pré-testes com remoção de debris em aços. Para isso, foi montado um sistema de remoção de debris via ar comprimido para retirar os debris gerados durante o ensaio. Após os resultados dos pré-testes, com a intenção de eliminar potenciais impurezas existentes na linha de ar comprimido que poderiam vir contaminar o contato tribológico, foi instalado um sistema de secagem e filtragem de ar comprimido. Adicionalmente, foram feitos também, ensaios com adição de partículas de óxidos de ferro, na tentativa de entender melhor a influência delas no comportamento tribológico.

Foram realizados também ensaios em alumínio, com a intenção de simular os debris presentes neste contato. Realizaram-se inicialmente ensaios secos com remoção de debris e também com adição de partículas. Após os resultados dos ensaios secos com adição de partículas, procurou-se uma condição que contribuísse para um melhor direcionamento das partículas no contato. Decidiu-se usar então soluções aquosas com partículas de alumina, como veículo para as partículas para o contato, na tentativa de simular a hidratação dos debris de desgaste, como observado por (KIM; WINDL; RIGNEY, 2007). Para estes ensaios foi variado o tamanho das partículas adicionadas ao contato e após os resultados destes, foi variada a concentração das partículas na solução aquosa.

No Capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o comportamento dos debris, onde é abordada a influência da remoção de debris e também da adição de diferentes partículas no comportamento tribológico, para diferentes sistemas tribológicos estudados anteriormente por outros autores.

No Capítulo III é feita a descrição da metodologia experimental e dos recursos laboratoriais utilizados.

O Capítulo IV apresenta os resultados experimentais e as discussões relevantes ao trabalho.

Concluem-se, no Capítulo V, os principais resultados, enquanto apresentam-se, no Capítulo VI, propostas de trabalhos futuros decorrentes das observações e conclusões do presente trabalho.

## **CAPÍTULO II**

### **Revisão Bibliográfica**

O deslizamento de duas superfícies leva à formação de debris, onde alguns deles são removidos do contato após sua formação, mas alguns permanecem no contato e podem sofrer transformações, modificando as tensões no contato e contribuindo na formação de tribocamadas protetoras (FISCHER et al., 2000). Por esta razão, a formação e o papel dos debris no comportamento tribológico de superfícies em contato, tem sido estudado por muitos anos (COCKS, 1958). No entanto, a literatura é controversa quanto à influência da presença de debris no comportamento tribológico, sendo atribuídos efeitos positivos e negativos com relação a esta influência.

Em sistemas lubrificados, a contaminação do óleo lubrificante é geralmente tratada como negativa, pois o coeficiente de atrito aumenta devido às forças necessárias para a movimentação destes no contato e também o desgaste, devido à ação abrasiva dos debris gerados (YUAN et al., 2005), e em particular no caso de mancais (SANTANAM, 1983; HAMILTON; SAYLES; IOANNIDES, 1998). A presença dos debris pode ainda causar entupimentos do sistema de lubrificação, e também poluir o fluido lubrificante, afetando negativamente o desempenho de alguns processos de manufatura. Por exemplo, na laminação a frio de chapas de aços inoxidáveis, a limpeza das chapas é feita pelo óleo lubrificante, onde os debris podem influenciar neste processo de limpeza, afetando a estética das chapas laminadas (LABIAPARI et al., 2015).

Por outro lado, a literatura também mostra trabalhos onde a presença dos debris é benéfica para o desempenho tribológico. Um dos pioneiros neste estudo foi o trabalho de Halliday e Hirst, (HALLIDAY; HIRST, 1956), que mostraram que a remoção dos debris do contato tribológico causava um aumento drástico do coeficiente de atrito. Os autores alegaram que os debris no contato agiriam como micro rolamentos reduzindo o atrito. Outro trabalho mostra o efeito positivo dos debris, variando-se a geometria do pino em contatos pino sobre disco. Os autores verificaram que os pinos com pontas arredondadas facilitam o acesso dos debris no contato, contribuindo para a formação de tribocamadas protetoras, enquanto pinos

com pontas chatas dificultariam esta entrada (BARRAU et al., 2007). Esta recirculação dos debris no contato e também retenção do material transferido são necessárias para a formação de tribocamadas protetoras (HARRIS et al., 2015).

Em um trabalho realizado anteriormente, foi estudado o efeito conjunto da lubrificação sólida (compósitos sinterizados contendo partículas de lubrificante sólido dispersos em uma matriz metálica por um processo de mistura simples) com a presença de um lubrificante líquido em regime de lubrificação conjunta, em uma configuração de desgaste por deslizamento alternado. A matriz dos compósitos utilizados no trabalho foi baseada em uma liga Fe-1,0%Si-0,6%C, enquanto que foram adicionados como lubrificantes sólidos 2,5% de grafite e 5% de nitreto hexagonal de boro (hBN). A natureza da matriz foi modificada também pela adição de molibdênio resultando em duas diferentes ligas: uma ferrito-perlítica (HV= 171±57), e outra martensítica (HV= 298±38), nomeadas respectivamente de C e P (OLIVEIRA JR, 2013; OLIVEIRA JR et al., 2017).

Os ensaios tribológicos de desgaste por deslizamento recíprocos foram efetuados como proposto por De Mello e Binder, (DE MELLO; BINDER, 2006), que consiste em um método de carregamento incremental, com adições de 7 N, em intervalos de 10 minutos. Assim é estudada a durabilidade do regime de lubricidade, definida como o trabalho [N.m] para que o coeficiente de atrito ultrapasse o valor de 0,2.

A Figura 2.1 mostra o coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra, para as amostras C e P. Observa-se que para a amostra C em ambos os modos de lubrificação (seco ou lubrificado com óleo), o coeficiente de atrito aparece baixo e uniforme no início do ensaio. Após certo tempo, o coeficiente de atrito tende a aumentar juntamente com o aumento da distância deslizada, com um aumento significativamente maior nas extremidades da marca de desgaste sendo que, este aumento é maior para as ligas ferrito-perlíticas do que para as ligas martensíticas.

Adicionalmente, a utilização do fluido lubrificante promoveu uma redução significativa no coeficiente de atrito e aumentou drasticamente a durabilidade do regime de lubricidade ( $\mu < 0,2$ ) do sistema tribológico.

A princípio, o aumento considerável do atrito nas extremidades das marcas de desgaste pode ser explicado por dois diferentes fenômenos:

- i- A mudança de regime de lubrificação associada à dinâmica do movimento alternativo;

- ii- O acúmulo de debris na extremidade da marca de desgaste. Este efeito também é desencadeado pela alternância do movimento, em particular a inversão de sentido, com consequente parada nos pontos mortos.

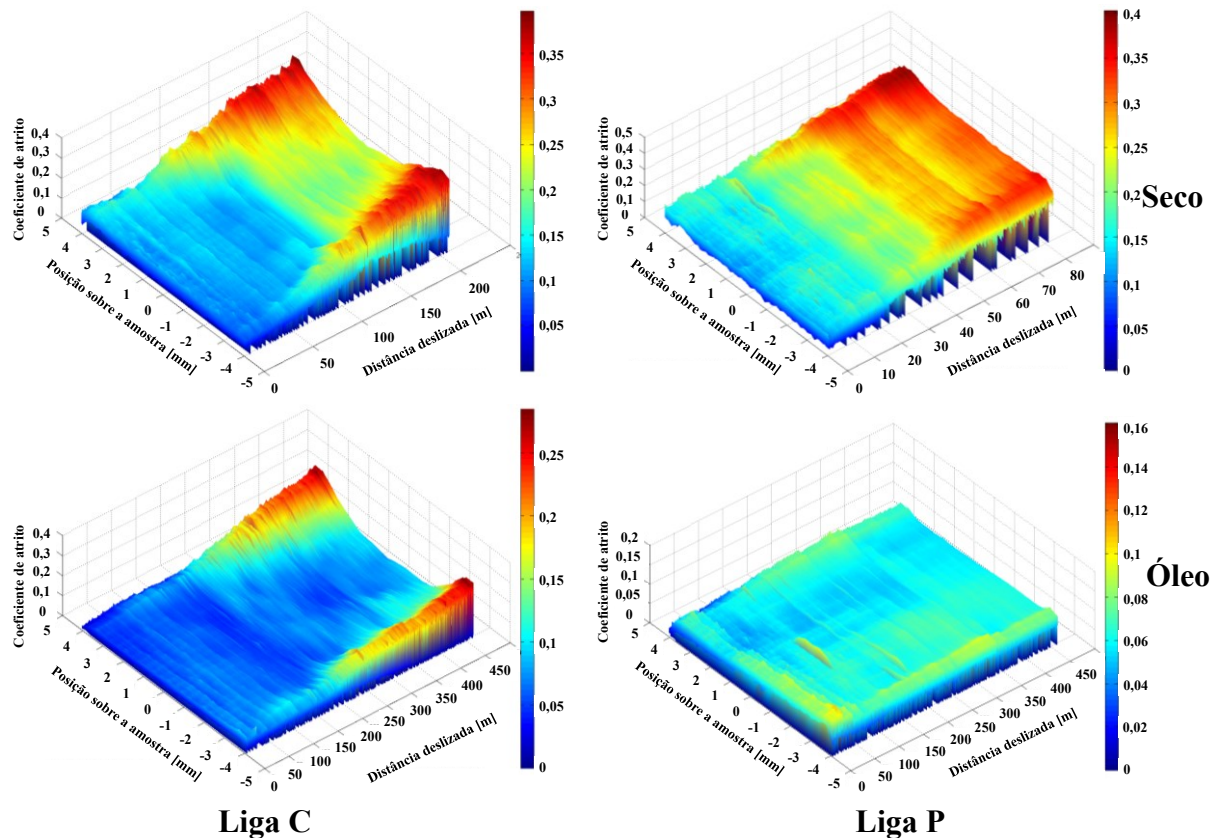


Figura 2.1: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra (OLIVEIRA JR et al., 2017).

O primeiro fenômeno é restrito a pares tribológicos em contatos lubrificados por um lubrificante líquido, enquanto que o segundo pode atuar tanto em contatos lubrificados por lubrificantes líquidos quanto em contatos secos.

Sherrington e Hayhurst (SHERRINGTON; HAYHURST, 2001) estudaram detalhadamente o efeito do acúmulo de debris de desgaste no coeficiente de atrito atuante em contatos a seco entre diferentes aços. Especial ênfase foi dada à dureza dos pares em contato.

É visualizada na Figura 2.2 a densidade de debris em função do tempo de ensaio para aços de durezas diferentes. As combinações que envolvem os aços mais duros apresentam as menores taxas de formação de debris. Adicionalmente, os autores mostraram que as combinações que envolvem aços com maiores diferenças de durezas apresentam as maiores taxas de formação de debris. Nota-se, também, que a formação de debris é bem mais intensa nas fases iniciais dos ensaios.

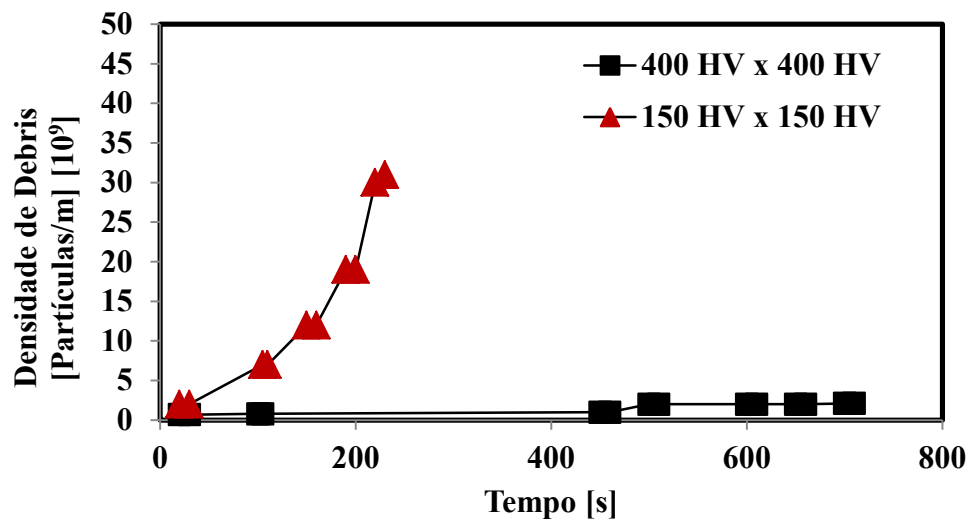


Figura 2.2: Densidade de Partículas em função do tempo de ensaio (adaptado de SHERRINGTON; HAYHURST, 2001).

A Figura 2.3 ilustra o coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para os pares com maior e menor dureza ensaiados contra eles mesmos. Nota-se que o coeficiente de atrito para ambos os pares evolui de forma similar até pouco mais que 100 segundos. Após esse tempo, o coeficiente de atrito aumenta com maior intensidade para o par com menor dureza, devido à maior formação de debris de desgaste, como mostrado na Figura 2.2, enquanto que, para o par mais duro, este aumento só se dá após os 400 segundos.

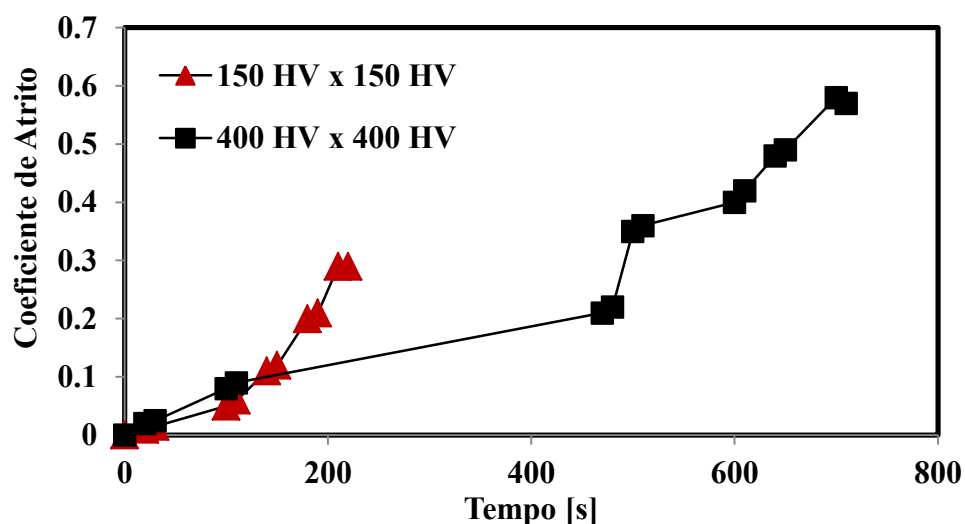


Figura 2.3: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio (adaptado de SHERRINGTON; HAYHURST, 2001).

De fato, na Figura 2.4, o material mais macio apresenta uma densidade de debris muito maior que o material mais duro para um mesmo coeficiente de atrito. As partículas de desgaste foram retiradas do contato utilizando-se uma fita adesiva de papel e posteriormente

analisadas em uma mesma densidade de debris ( $5 \times 10^9$  partículas.m<sup>-1</sup>), evidenciando que as partículas de desgaste do par mais duro são pelo menos cinco vezes maiores que as partículas de desgaste do par com menor dureza (SHERRINGTON; HAYHURST, 2001). Por outro lado, sabe-se que maiores partículas de desgaste levam a coeficientes de atrito mais altos, como mostrado por (SUH; SIN, 1981; ODI-OWEI; ROYLANCE, 1986).

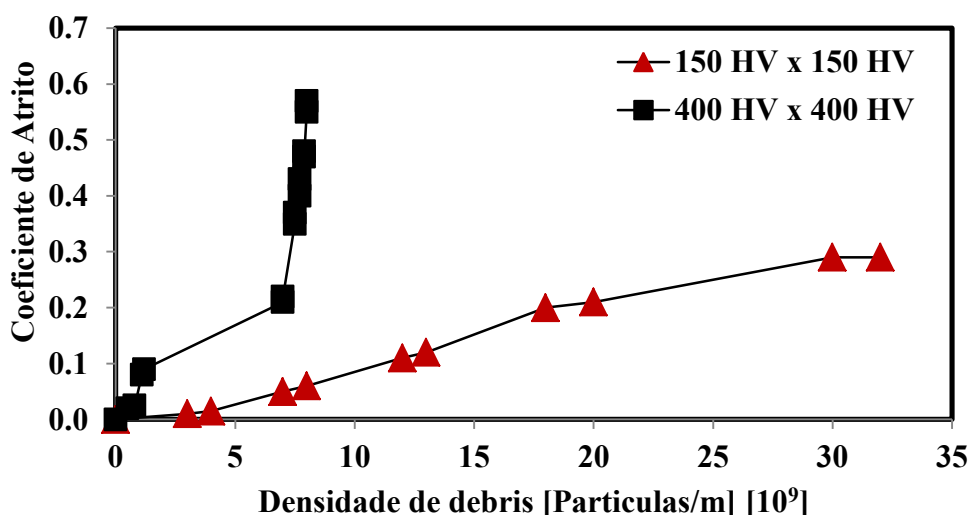


Figura 2.4: Evolução do coeficiente de atrito em função do aumento da densidade de debris (adaptado de SHERRINGTON; HAYHURST, 2001).

A durabilidade das ligas ferrito-perlíticas é maior (ligas com lubrificante sólido) ou igual (ligas matrizes - sem adição de lubrificantes sólidos) do que a durabilidade das ligas martensíticas, devido à geração de tribocamadas. Em consequência disso, o maior tempo de ensaio da amostra C, acarreta um maior desgaste, gerando um maior acúmulo de debris. De fato, perfis da marca de desgaste, Figura 2.5, ilustram claramente o montante de desgaste apresentado.

Já a Figura 2.6 evidencia a maior quantidade de debris gerados nas amostras ferrito-perlíticas. Este trabalho foi a motivação para o estudo da influência da presença dos debris no comportamento tribológico.

Durante o deslizamento de uma liga Cu-10%Zn, o coeficiente de atrito mostrou uma transição acentuada (de 0,35 para 1,1) coincidindo com uma concentração de debris ao redor do contato. Este aumento foi atribuído a uma transição no mecanismo de desgaste para abrasivo, devido a essa acumulação de debris no contato (BLAU, 1981). Esta observação também foi verificada por (VIÁFARA; SINATORA, 2011).

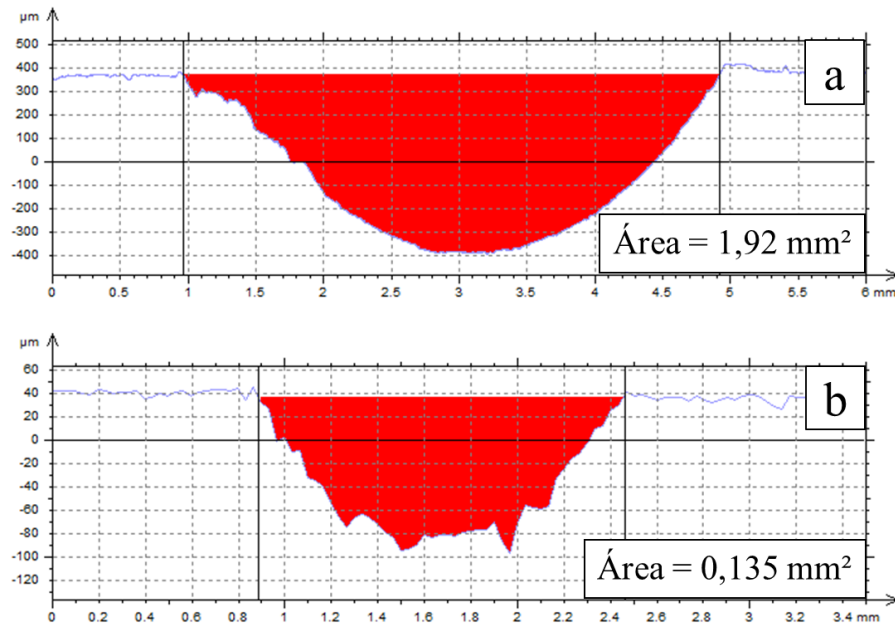


Figura 2.5: Perfis transversais das marcas de desgaste. (a) Amostra C; (b) Amostra P (OLIVEIRA JR et al., 2017).

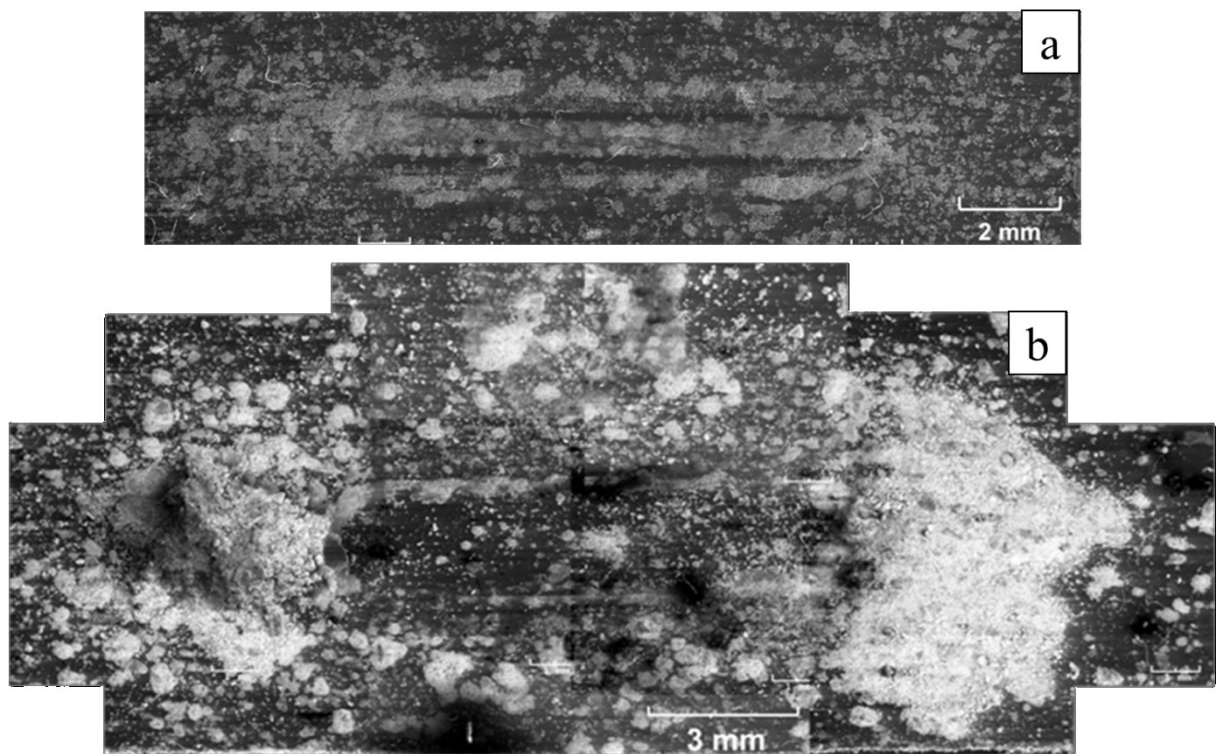


Figura 2.6: Aspecto típico da distribuição das partículas de desgaste. (a) Liga P. (b) Liga C (OLIVEIRA JR et al., 2017).

Como comentado anteriormente vários autores também estudaram o efeito dos debrís no comportamento tribológico. Um exemplo de efeito negativo da presença dos debrís foi mostrado por Viáfara e Sinatora (VIÁFARA; SINATORA, 2011). Eles estudaram o efeito da



remoção intermitente de debris no coeficiente de atrito em aços através de ensaios de desgaste por deslizamento do tipo pino sobre disco, onde utilizaram um disco de feltro para a remoção dos debris. Os resultados encontrados por eles são mostrados na Figura 2.7. Nota-se que nos estágios onde foram feitas remoções de debris, é possível perceber uma queda no coeficiente de atrito em cerca de 50%. Este efeito também foi observado por (USMANI; SAMPATH, 1999).

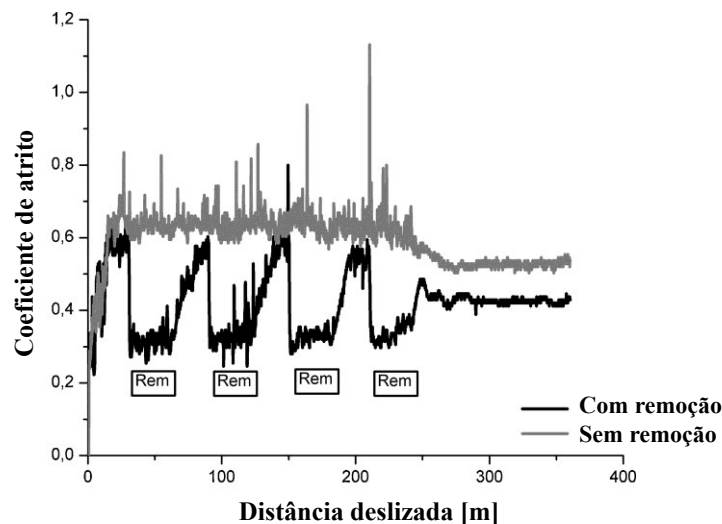


Figura 2.7: Evolução do coeficiente de atrito (VIÁFARA; SINATORA, 2011).

A Figura 2.8 evidencia os mecanismos de desgaste encontrados por Viáfara e Sinatora, onde na Figura 2.8-a é apresentada a condição exatamente antes da interrupção da remoção dos debris (aos 240m) e na Figura 2.8-d é exibida a condição ao final do teste (aos 252m). A Figura 2.8-b e a Figura 2.8-c mostram respectivamente imagens obtidas por MEV via elétrons secundários e retroespalhados para a condição sem remoção dos debris (Figura 2.8-a). A Figura 2.8-e e a Figura 2.8-f apresentam respectivamente imagens obtidas por MEV via elétrons secundários e retroespalhados para a condição com remoção dos debris (Figura 2.8-d).

Percebe-se que para a condição com remoção há deformações plásticas (mostradas pelas setas na Figura 2.8-a e na Figura 2.8-d) e aparentemente não há formação de óxidos, evidenciada pela Figura 2.8-c. Enquanto que para a condição sem remoção, há a presença de marcas de abrasão e formação de óxidos (Figura 2.8-f), onde debris oxidados e duros poderiam estar contribuindo para estes fatos, como relatado pelos autores e também mencionado por (BLAU, 1981; SUH; SIN, 1981).

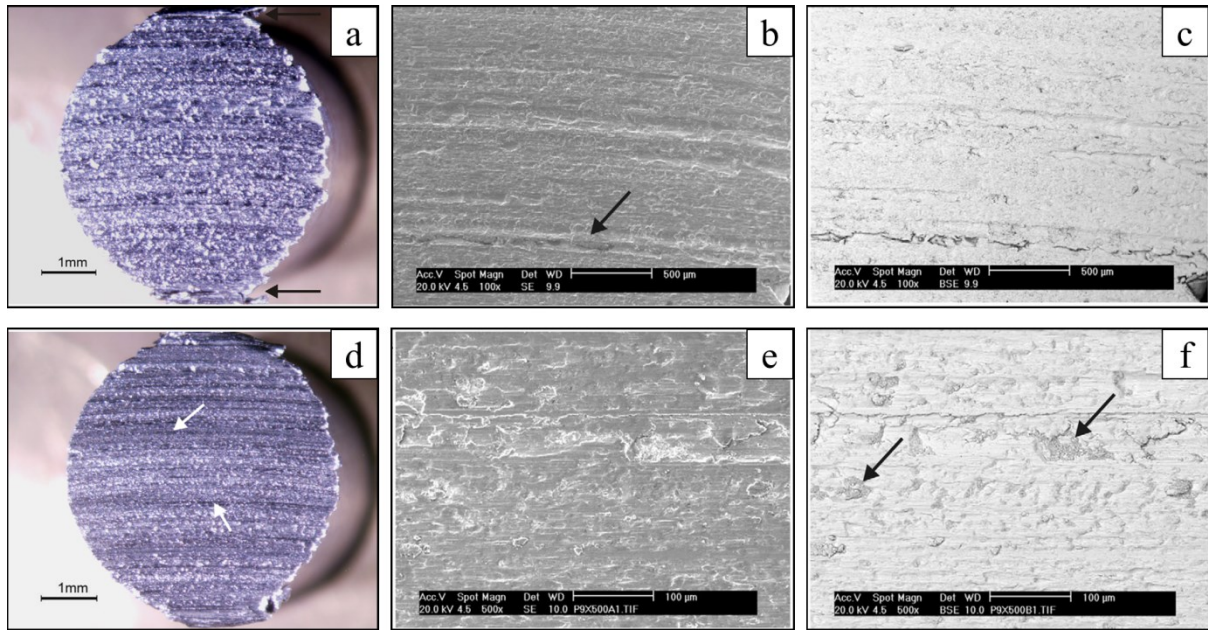


Figura 2.8: Mecanismos de desgaste. (a) Com remoção de debris (240m); (d) Sem remoção de debris (252 m); (b, c) Imagens obtidas por MEV para os ensaios sem remoção; (e, f) Imagens obtidas por MEV para os ensaios com remoção (adaptado de VIÁFARA; SINATORA, 2011).

Este efeito também foi observado por (SHEASBY; VANDERGEEST, 1981), que removeram os debris do contato com o auxílio de escovas. Os autores observaram uma redução do coeficiente de atrito em duas vezes acompanhada de uma redução da taxa de desgaste em 200 vezes, quando removidos os debris. Adicionalmente, observaram que as superfícies dos pinos ensaiados com remoção de debris (Figura 2.9-a) apresentaram uma aparência mais lisa e com pouca oxidação do que quando comparadas com as superfícies dos pinos utilizados nos ensaios sem remoção de debris (Figura 2.9-b), que apresentaram um maior desgaste e também marcas de abrasão, sugerindo então que a ação abrasiva destes estaria então contribuindo para o aumento no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste.

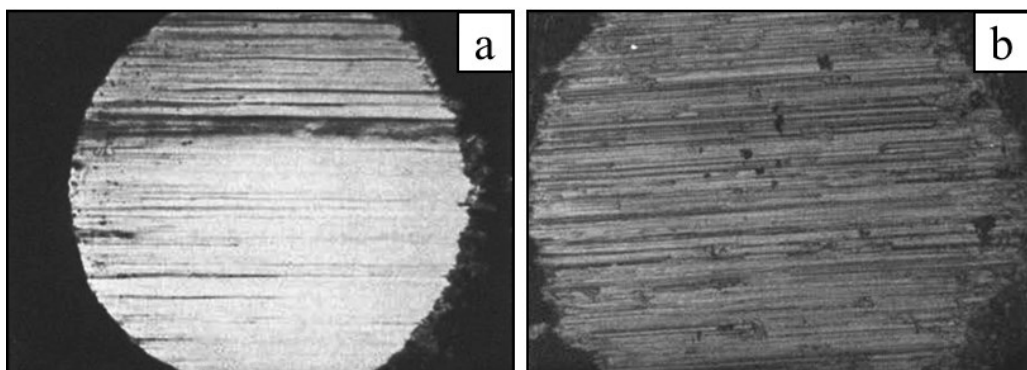


Figura 2.9: Superfícies dos pinos de bronze desgastados. (a) Teste com remoção de debris. (b) Teste sem remoção. Ampliação de 48 vezes. (Adaptado de SHEASBY; VANDERGEEST, 1981).

O efeito da remoção dos debris foi estudado também por Leheup e Pendlebury, onde verificaram este efeito na taxa de desgaste, realizando testes de fretting, utilizando-se de amostras de aço inoxidável 304, com a presença de um fluxo de ar entre as superfícies, aplicado com diferentes pressões, variando até 4 bar (LEHEUP; PENDLEBURY, 1991). Os autores concluíram que, se existe uma pressão de gás significativa para expulsar os debris da região desgastada, isso causaria um aumento significativo na taxa de desgaste. A Figura 2.10 apresenta as taxas de desgaste das amostras para os ensaios com e sem remoção de debris. Os ensaios sem remoção de debris, ou seja, quando a pressão do ar é igual a zero, a taxa de desgaste apresenta os menores valores. Ao aumentar-se a pressão do ar, a taxa de desgaste aumenta progressivamente, ao passo que, quando são executados testes com pressões maiores (4 bar) a taxa de desgaste apresenta os maiores valores (cerca de  $7 \pm 1 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{ m}^{-1} \text{ N}^{-1}$ ).

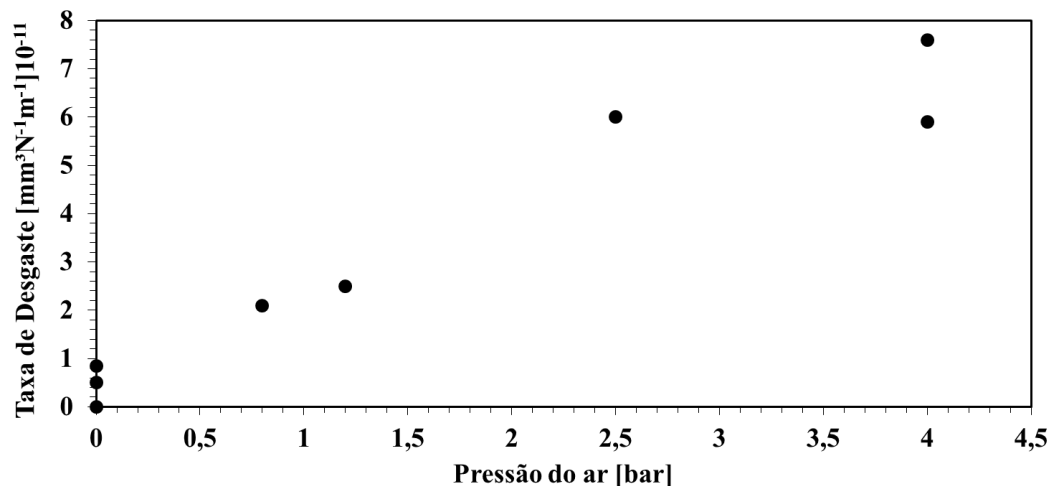


Figura 2.10: Taxa de desgaste para as condições ensaiadas com e sem remoção (Adaptado de LEHEUP; PENDLEBURY, 1991).

Além do efeito da remoção dos debris do contato tribológico, a literatura também apresenta trabalhos sobre o efeito da adição de debris, pois como estudado por diversos autores, os debris são fundamentais na formação de tribocamadas.

A literatura mostra que as tribocamadas podem se formar de diferentes formas, dependendo do tipo de interação entre os debris, a superfície em contato e também o ambiente em que estão inseridos. Em contatos com pinos com geometrias curvas, por exemplo, contatos do tipo esfera-plano, a recirculação dos debris é muito mais intensa que em contatos plano-plano, onde os debris expulsos do contato dificilmente voltariam a participar na formação de tribocamadas protetoras (BARRAU et al., 2007). Esta recirculação dos debris no contato e também retenção do material transferido são necessárias para a formação de tribocamadas protetoras (HARRIS et al., 2015).

A Figura 2.11 mostra um desenho esquemático das camadas formadas em uma superfície, onde estas variam de camadas produzidas por interações físicas e químicas com o ambiente. Em geral, os metais e ligas reagem na presença de oxigênio do ar e formam camadas de óxidos em suas superfícies, formadas através de reações químicas com o ambiente. No entanto, em outros ambientes, é provável que formem camadas de outras naturezas como camadas de nitretos, sulfetos, cloretos, etc. (KUBASCHEWSKI; HOPKINS, 1953).

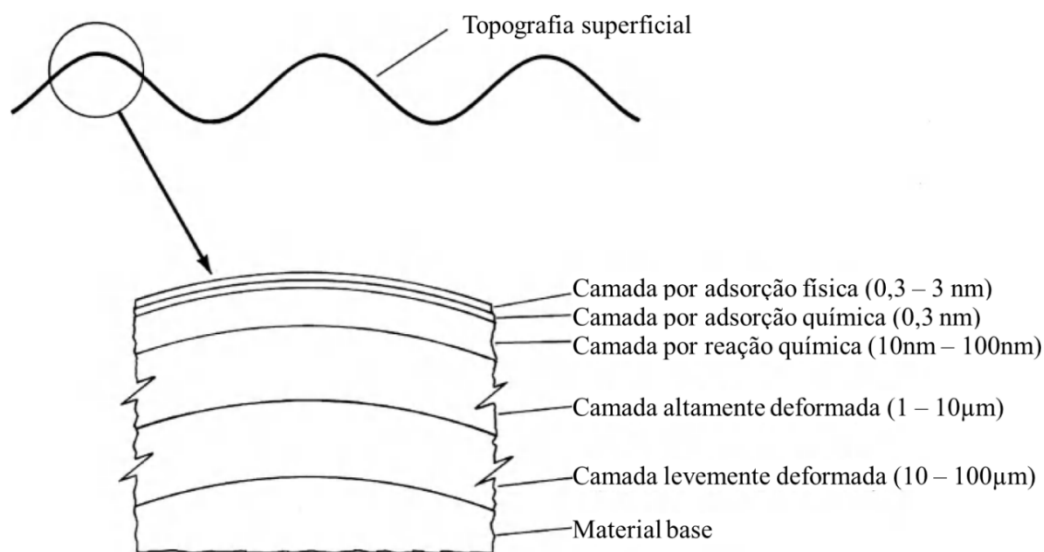


Figura 2.11: Esquema de camadas superficiais formadas através de interações físico-químicas (Adaptado de BHUSHAN, 2013).

Um esquema dos vários tipos de interações entre os átomos presentes nas camadas formadas é mostrado na Figura 2.12. Nas camadas produzidas por adsorção física não ocorre a troca de elétrons entre as moléculas, onde o processo se dá basicamente através de forças de Van der Waals. Já na adsorção química, há a troca de elétrons, propiciando a interação entre a camada e a superfície através de ligações covalentes, sendo comparável até com as ligações formadas pelas camadas produzidas através de reações químicas (BHUSHAN, 2013).

A espessura das camadas de óxidos formadas depende da reatividade dos materiais com o meio ambiente, da temperatura de reação e também do tempo de reação. As espessuras típicas destas camadas variam de 10 a 100 nm, embora possam ser formadas camadas muito mais espessas, como por exemplo, em processos de usinagem ou em contatos com atrito, onde o calor liberado aumenta a taxa de oxidação levando a vários tipos de óxidos (BHUSHAN, 2013).

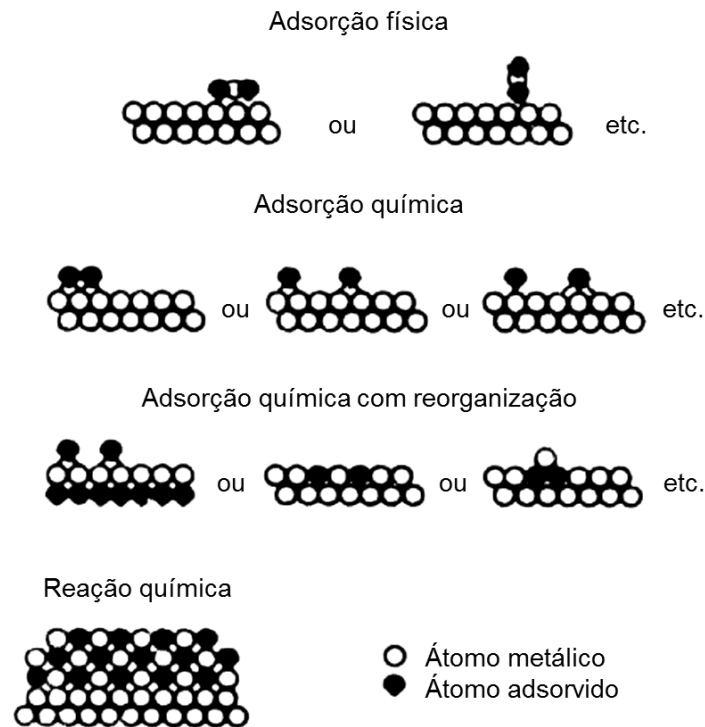


Figura 2.12: Diagramas esquemáticos da adsorção física, química e reação química (BUCKLEY, 1981).

Em contatos tribológicos, devido ao aumento da temperatura, a reação química com o meio ambiente é acelerada e a reação pode ocorrer entre as camadas de óxidos de ambas as superfícies em contato. As camadas de óxidos podem ser de um ou mais óxidos elementares, como por exemplo, em ligas ferrosas, podem se formar óxidos tais como,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$ . Essas camadas podem possuir características químicas muito diferentes do restante do material, devido às interações com o ambiente e/ou outros corpos. E ainda, o comportamento mecânico das mesmas é significativamente influenciado pela quantidade e profundidade das camadas subsuperficiais deformadas.

Um estudo sobre a formação de óxidos em contatos tribológicos com pares aço-aço, foi realizado por Straffelini, Trabucco e Molinari (STRAFFELINI; TRABUCCO; MOLINARI, 2001). Os debrís coletados após ensaios de deslizamento foram analisados via raios-X. Quando analisados, foi constatado que a maior parte deles era composta de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (cerca de 95%), com pequenas porções de ferro- $\alpha$  (menos que 5%) e aproximadamente 1% de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . A Figura 2.13 mostra o espectro de raios-X dos debrís coletados após os ensaios. Outros autores também encontraram resultados similares (SULLIVAN; HODGSON, 1988; SO, 1995).

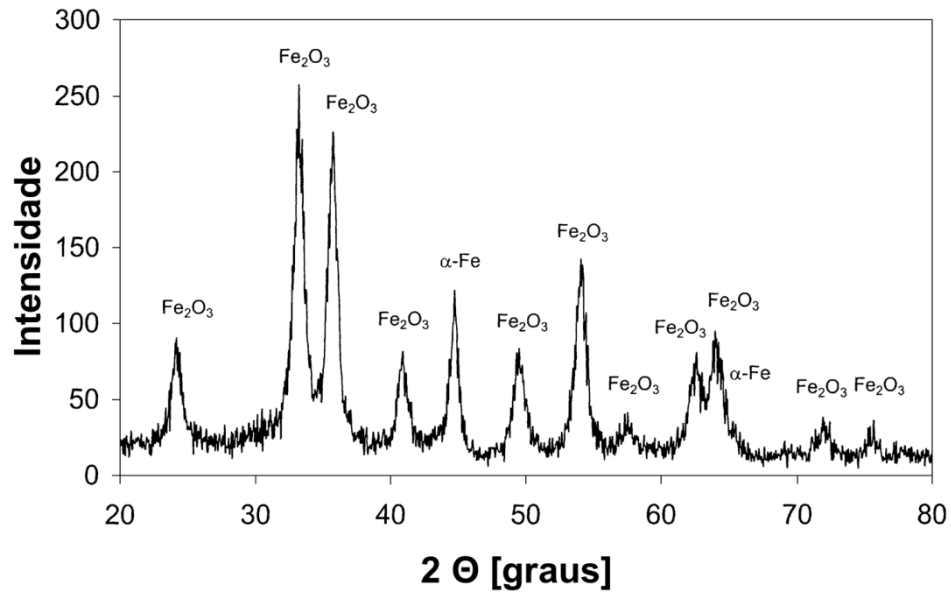


Figura 2.13: Espectro de Raios-X de debris coletados (STRAFFELINI; TRABUCCO; MOLINARI, 2001).

Um levantamento na literatura sobre os valores de resistividade dos óxidos de ferro foi realizado por Bozzi (BOZZI, 2004). Este compilado está exibido na Figura 2.14, onde nota-se que os valores de resistividade dos óxidos de ferro apresentam valores com diferenças de várias ordens de grandeza entre eles, com valores médios de cerca de  $10^7 \Omega.m$  para a hematita ( $Fe_2O_3$ ),  $10^1 \Omega.m$  para a wustita ( $FeO$ ) e  $10^{-4} \Omega.m$  para a magnetita ( $Fe_3O_4$ ), sendo que a wustita e a magnetita não apresentam resistividade suficientemente grande para serem classificadas como isolantes elétricos.

Sendo assim, em ensaios tribológicos, onde a medição do potencial de contato ajuda na interpretação dos resultados, pode também levar a interpretações errôneas sobre a formação de camadas isolantes. Mas, como mostrado na Figura 2.13, os óxidos com maior formação em contatos aço-aço são também, os que possuem maior resistividade elétrica, sendo portanto mais facilmente detectáveis as camadas formadas por estes óxidos. Então, em contatos aço-aço, pode-se admitir que a resistividade das camadas de óxidos é originada das camadas de hematita (SENKEVICH; JONES; CHATTERJEE, 2000).

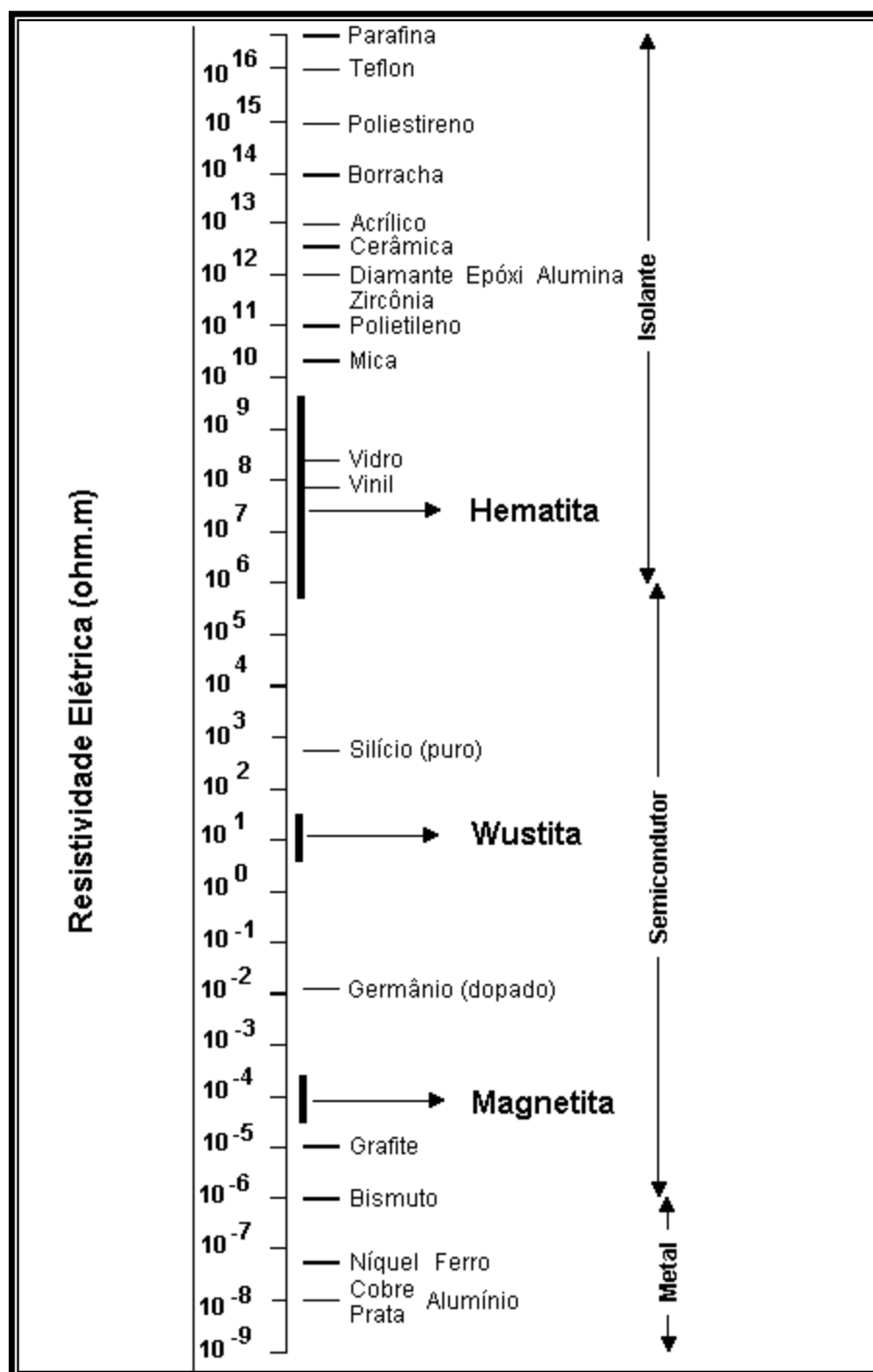


Figura 2.14: Compilado de valores das resistividades elétricas para diversos materiais destacando as faixas dos valores da resistividade da magnetita, hematita e wustita encontrados na literatura e compilados por (BOZZI, 2004).

A influência da adição de partículas de ferro e de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) no comportamento tribológico de um aço carbono com dureza de 160 HV foi estudada por (KATO, 2003). Foi efetuado um sulco no disco, de forma que todas as partículas adicionadas e também os gerados permanecessem no contato, sendo uma quantidade suficiente para que se formasse um acúmulo de debris à frente do pino, esquema este proposto por (STRAFFELINI;

TRABUCCO; MOLINARI, 2001). A Figura 2.15 mostra o aparato utilizado por Kato e o esquema proposto por Straffelini, Trabucco e Molinari.

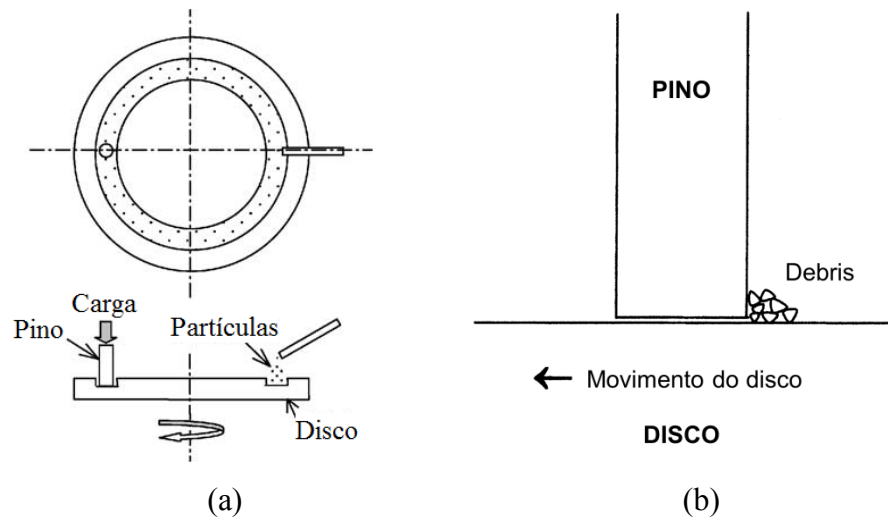


Figura 2.15: (a) Aparato utilizado por Kato (Adaptado de KATO, 2003). (b) Esquema proposto por Straffelini, Trabucco e Molinari (Adaptado de STRAFFELINI; TRABUCCO; MOLINARI, 2001).

Foram estudados por Kato, quatro tamanhos diferentes de partículas de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e para comparação foram utilizados dois tamanhos diferentes de partículas de ferro. A Figura 2.16 apresenta a evolução do coeficiente de atrito em função da distância deslizada para diferentes tamanhos de partículas adicionadas ao contato, e também, como comparação, o sistema sem adição. Percebe-se na Figura 2.16-a (com adição de partículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que os ensaios utilizando as partículas de tamanhos 0,3 e 0,5  $\mu\text{m}$  apresentaram os menores coeficientes de atrito. Já os ensaios realizados com adição das menores partículas (30 nm) apresentaram também valores de coeficiente de atrito menores do que a condição sem adição, porém maior que as duas anteriormente citadas. Já os ensaios com as maiores (1  $\mu\text{m}$ ) apresentaram o maior coeficiente de atrito.

Na Figura 2.16-b são mostrados os valores de coeficiente de atrito para os ensaios com adição de partículas de ferro, onde se pode notar que as partículas de menor tamanho (20 nm) apresentaram o menor atrito. Os ensaios sem adição apresentaram valores de coeficiente de atrito intermediários. Já os ensaios com adição das maiores partículas (1,65  $\mu\text{m}$ ), novamente apresentaram os maiores valores de coeficiente de atrito. Os autores atribuíram este comportamento diferente a uma transição no regime de desgaste passando do severo para o suave, quando adicionadas as menores partículas.



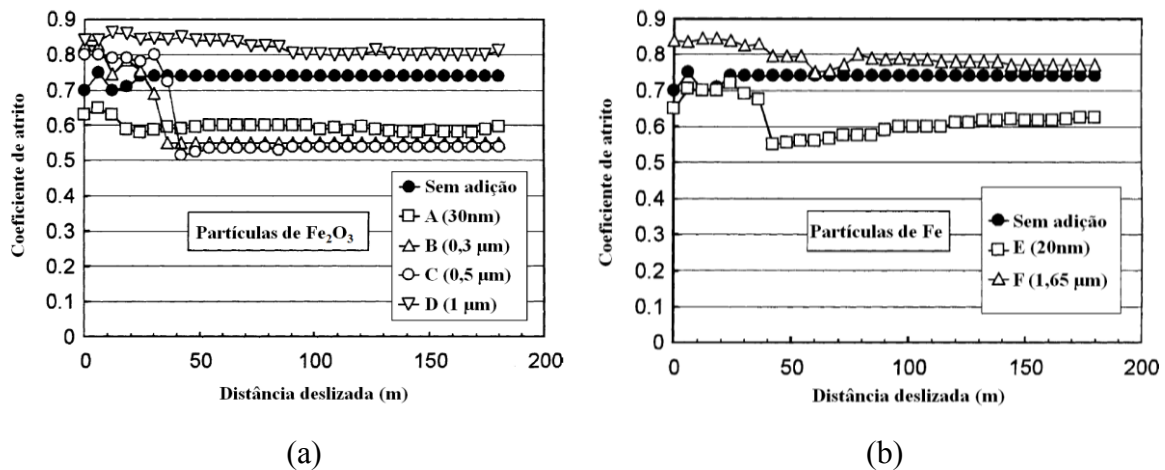


Figura 2.16: Evolução do coeficiente de atrito para diferentes tamanhos de partículas. (a) Partículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . (b) Partículas de Fe (KATO, 2003).

A influência do tamanho das partículas no volume desgastado foi também estudada por Kato. A Figura 2.17 mostra a evolução do volume desgastado em função da distância deslizada para os mesmos tamanhos de partículas. Na Figura 2.17-a nota-se que os ensaios com adição das maiores partículas e os ensaios sem adição, apresentaram os maiores volumes desgastados. Já os ensaios com adição das menores partículas apresentaram o menor volume desgastado.

Um comportamento similar é identificado na Figura 2.17-b, onde novamente os ensaios com adição das menores partículas resultaram em um volume desgastado menor. Isso pode ser explicado, segundo o autor, pela transição no regime de desgaste passando do regime severo para o suave, devido a uma maior compactação e espalhamento das partículas menores, contribuindo para a formação de uma tribocamada protetora.

Outros autores também estudaram o efeito da presença de particulados na formação de camadas protetoras (IWABUCHI; KUBOSAWA; HORI, 1990; JIANG; STOTT; STACK, 1998).

Foi estudada recentemente a influência da adição de diversos tipos de particulados em um par de aços em um contato do tipo deslizamento pino sobre disco (RODRIGUES et al., 2015; RODRIGUES et al., 2016). Os autores verificaram a influência da adição de partículas de cobre com diferentes tamanhos 50 nm, 20  $\mu\text{m}$  e 400  $\mu\text{m}$ , além de adicionarem magnetita com 50 nm e grafite 25  $\mu\text{m}$ .

Os ensaios foram do tipo pino sobre disco com carga normal de 10 N e velocidade de deslizamento de  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ , com temperatura controlada de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ . Foram utilizados pinos com pontas planas, com 4,8 mm de diâmetro e 7 mm de comprimento. Nos discos foram

usinadas trilhas com 7 mm de largura e 2 mm de profundidade de modo que os debris permanecessem no contato, como proposto por (KATO, 2003). Foram usados discos de aço AISI 4140 martensítico ( $HV = 200 \pm 3 \text{ kgf.mm}^{-2}$ ) e pinos de aço ferramenta AISI H13 ( $HV = 419 \pm 5 \text{ kgf.mm}^{-2}$ ).

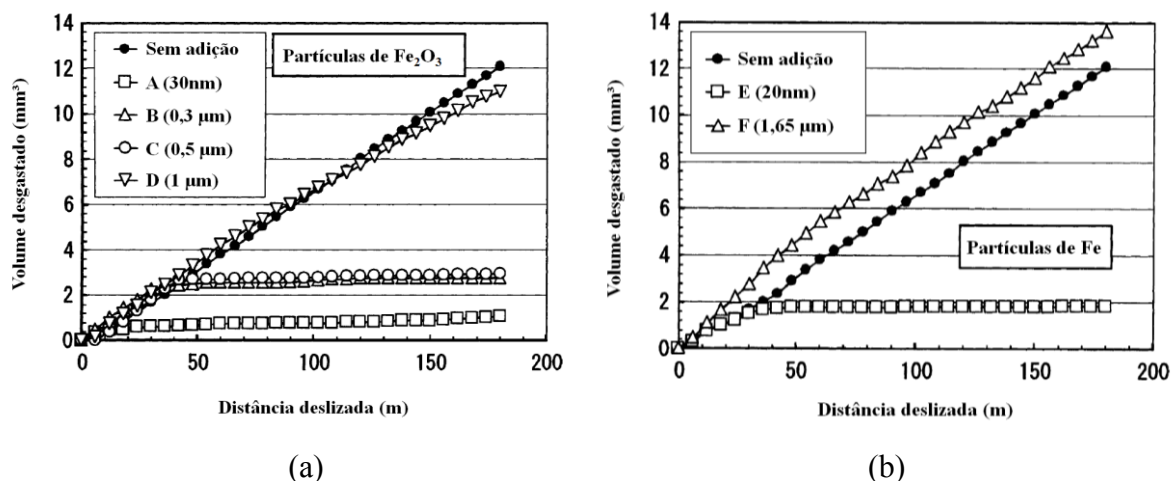


Figura 2.17: Evolução da taxa de desgaste para diferentes tamanhos de partículas. (a) Partículas de  $Fe_2O_3$ . (b) Partículas de Fe (KATO, 2003).

O coeficiente de atrito em função da distância deslizada é mostrado na Figura 2.18. Nota-se que os ensaios realizados com as partículas de cobre, apresentaram coeficientes de atrito superiores aos apresentados pelos ensaios sem adição (até cerca de 30%), sendo que os ensaios com as menores partículas apresentaram os maiores valores.

Por outro lado, os ensaios com adição de magnetita apresentaram valores de coeficiente de atrito cerca de 15% abaixo do que os encontrados para os ensaios sem adição. Enquanto que, os ensaios com adição de grafite foram os que apresentaram o menor coeficiente de atrito, o que já era esperado, devido às suas propriedades lubrificantes, sendo valores abaixo de 0,2, cerca de 60% menores que os valores apresentados pelos ensaios sem adição.

As trilhas de desgaste foram analisadas via MEV-EDS através de mapas de composição química. Foi detectada a presença de ferro, oxigênio e cobre nas tribocamadas presentes nos ensaios efetuados com adição de cobre com 50 nm (Figura 2.19), indicando que as partículas de cobre entraram e permaneceram no contato contribuindo para a formação de tribocamadas. Os ensaios com adição de cobre com 20 μm apresentaram mapas EDS semelhantes à condição com 20 nm. Já para os ensaios com adição de cobre com 400 μm e sem adição, não foi detectada a presença de cobre nas tribocamadas das trilhas, isto se deve ao fato de que provavelmente as partículas com 400 μm fossem grandes demais para entrarem no contato.

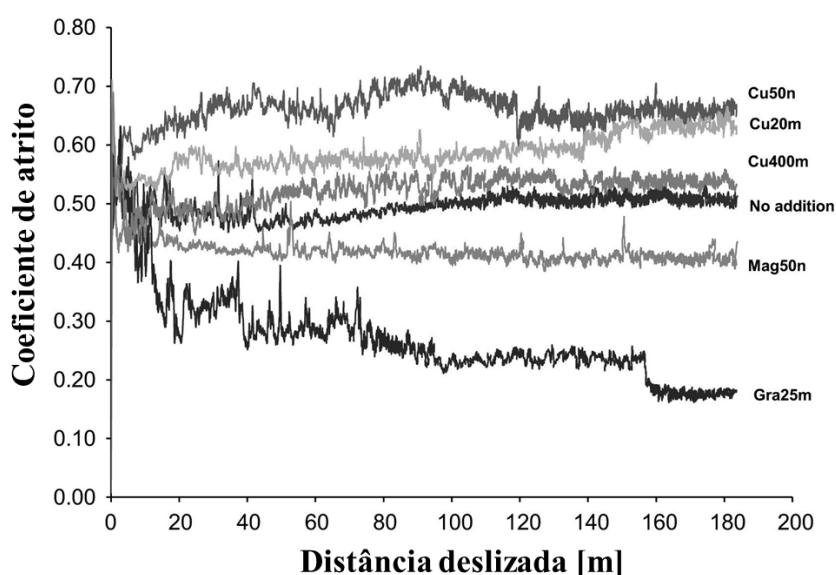


Figura 2.18: Coeficiente de atrito em função da distância deslizada (RODRIGUES et al., 2015).

Os autores analisaram ainda as condições subsuperficiais via MEV-FIB. Através da seção transversal é possível observar a espessura das tribocamadas geradas pelos debrís gerados/adicionados ao contato, e também das camadas subsuperficiais deformadas plasticamente que eventualmente geram os debrís que podem vir a participar da formação destas tribocamadas (RODRIGUES et al., 2015).

A Figura 2.20 exibe a seção transversal da superfície do pino testada sem adição. Nota-se que na Figura 2.20-a a tribocamada parece estar em processo de compactação/aglomeração para posterior formação de uma tribocamada contínua (seta branca - Figura 2.20-a). Adicionalmente, nota-se uma camada deformada sob as tribocamadas, mostrando a distorção dos grãos deformados plasticamente (cerca de 3  $\mu\text{m}$ ), e ainda mais abaixo, o material base sem traços de deformação plástica.

Na Figura 2.20-b e Figura 2.20-c são demonstradas as seções transversais dos pinos ensaiados com adição de cobre nos tamanhos de 400  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$  respectivamente, onde nota-se a presença de tribocamadas ainda em formação e algumas partes muito compactadas como evidenciado pelas setas brancas, onde esta compactação se apresenta mais presente para os ensaios com 20  $\mu\text{m}$  (Figura 2.20-c). Nota-se adicionalmente, que as espessuras das camadas deformadas plasticamente se mostraram muito diferentes para ambas as condições, sendo esta espessura muito maior quando as partículas adicionadas foram maiores (Figura 2.20-b - 400  $\mu\text{m}$ ), podendo estar associado à uma maior carga por partícula, levando à fragmentação destas

e conseqüentemente à deformação da subsuperfície, para posterior formação das tribocamadas compactadas.

Para a condição com adição de partículas com 50 nm (Figura 2.20-d), notou-se a presença de uma tribocamada com maiores discontinuidades quando comparadas com as outras condições ensaiadas pelos autores. Adicionalmente, observa-se também que a camada deformada também possui uma espessura inferior quando comparada com as demais condições.

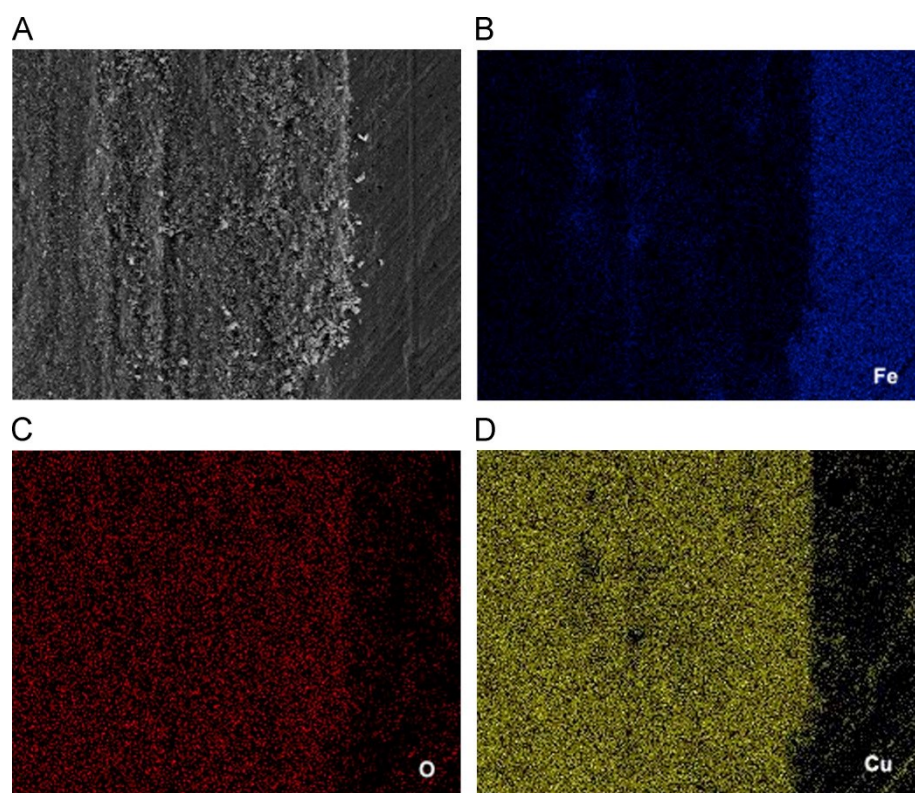


Figura 2.19: Mapas EDS do pino usado nos dos ensaios com adição de cobre com 20 n. (a) Imagem de MEV via elétrons secundários. (b), (c) e (d) Mapas EDS (RODRIGUES et al., 2015).

Além disso, os autores analisaram também as superfícies dos discos, através de seções transversais via MEV-FIB (RODRIGUES et al., 2016). A Figura 2.21-a mostra a seção transversal do disco ensaiado sem adição de partículas. A seta 1 destaca a camada deformada plasticamente (5~10 $\mu$ m) sendo esta, maior do que a camada apresentada pelo pino, muito provavelmente devido ao campo de tensão imposto pelas bordas do pino e também à diferença de dureza entre os materiais. A seta 2 destaca a presença de trincas subsuperficiais que podem levar à formação de debris, logo abaixo da deposição de platina. Por fim, a seta 3 evidencia a presença de uma tribocamada altamente compactada, provavelmente oriunda da fragmentação seguida da compactação dos debris gerados no contato.

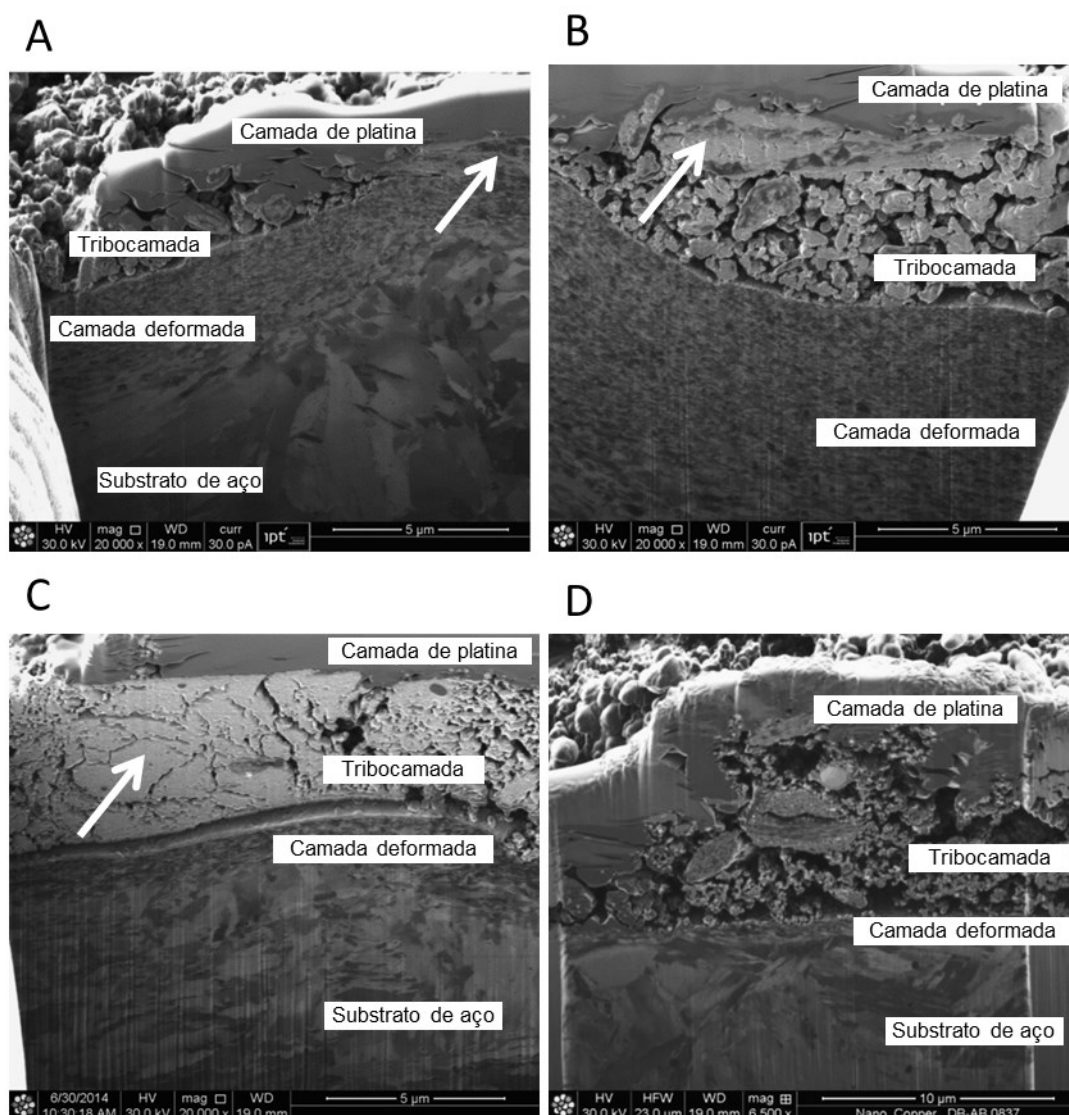


Figura 2.20: Seção transversal da marca de desgaste dos pinos. (a) Sem adição; (b) (c) e (d) Adição de partículas de cobre com 400  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  e 50 nm respectivamente (Adaptado de RODRIGUES et al., 2015).

Quando adicionados os debrís ao contato, como aconteceu para os ensaios com adição de cobre com 400  $\mu\text{m}$  (Figura 2.21-b) houve uma pequena formação de tribocamadas compactadas (seta 2) e uma maior quantidade de regiões com geração e acúmulo de debrís (seta 1). A quantidade de tribocamadas compactadas foi muito inferior quando comparadas com os ensaios com adição de partículas com 20  $\mu\text{m}$  (Figura 2.21-c), situação que apresentou uma camada deformada plasticamente maior (2~5 $\mu\text{m}$ ) do que para a condição com 400 $\mu\text{m}$  (2 $\mu\text{m}$ ). Verifica-se também a presença de uma partícula de cobre aderida à superfície do disco. Finalmente, na Figura 2.21-d, observou-se a formação de uma camada formada por partículas de cobre, que aparentemente sofreram processos de aglomeração (sinterização) e compactação.

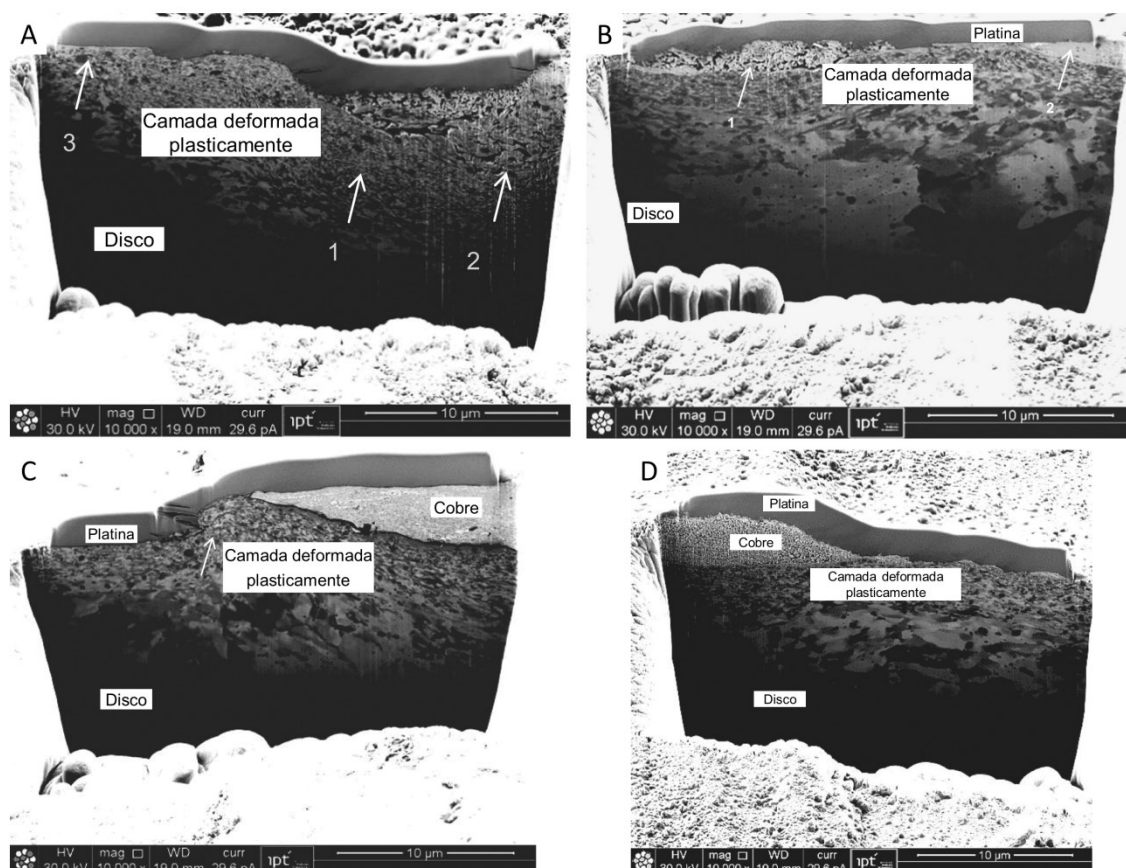


Figura 2.21: Seção transversal das marcas de desgaste dos discos. (a) Sem adição; (b) (c) e (d) Adição de partículas de cobre com 400  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  e 50 nm respectivamente (Adaptado de RODRIGUES et al., 2016).

Sendo assim, os autores propuseram dividir os resultados em dois pares: sem adição e com adição de 400 $\mu\text{m}$  e outro par formado pelas condições com adição de partículas com 20 $\mu\text{m}$  e 50nm. Sendo que no primeiro par, houve a formação de tribocamadas compactadas basicamente formadas por óxidos de ferro, enquanto que para o segundo par, foi detectada uma grande presença de debris ricos em cobre, podendo isso ser explicado por uma dificuldade na adesão das partículas maiores (400 $\mu\text{m}$ ) nas superfícies, sendo mais facilmente ejetadas do contato. Os maiores coeficientes de atrito apresentados pelas condições com adição das menores partículas também pode ser explicado por esta participação maior dos debris ricos em cobre (Figura 2.19-d), que promoveram um aumento no coeficiente de atrito.

Sistemas lubrificados podem sofrer contaminação por partículas sólidas, como poeira e/ou também por debris gerados internamente. Vários autores estudaram o efeito da presença de partículas adicionadas em óleos lubrificantes no comportamento tribológico, onde foram adicionadas partículas abrasivas no contato, contribuindo para um aumento do desgaste (RONEN; MALKIN, 1981; ODI-OWEI; ROYLANCE, 1986; MEHAN, 1988; MAYVILLE, 1990; MEHAN; FLYNN; GIAMMARISE, 1991; MITCHELL; MECHOLSKY JR; ADAIR,



2000; SEP; KUCABA-PIETAL, 2001; PENG; KESSISSOGLOU; COX, 2005; YUAN et al., 2005).

Quando adicionado pó de ferro, este contribuiu para uma redução no desgaste (YUAN et al., 2005). Foram adicionadas partículas de ferro no óleo lubrificante NC32, que é um tipo conhecido de óleo hidráulico segundo os autores, e foram adicionadas a este óleo, partículas de ferro com granulometria de até 100  $\mu\text{m}$  com dureza de aproximadamente 10 HRC. Foram utilizados como amostras, discos de aço ASTM 5140 com dureza de 52 HRC e, como contra corpo foram utilizadas esferas de aço AISI 52100 com dureza de 50 HRC.

A Figura 2.22 mostra a evolução do coeficiente de atrito em função do tempo para as situações com e sem adição de partículas. Há 3 regiões, denominadas pelos autores de 1- regime transiente de desgaste (*running-in*), 2- regime permanente de desgaste e 3- regime de desgaste severo. Para os ensaios sem adição (Figura 2.22-a), nota-se um início (região 1) com maiores variações no coeficiente de atrito. Na região 2, o coeficiente de atrito parece permanecer mais constante e com menores variações, seguido de um aumento abrupto (região 3), que depois tende a uma nova estabilização em um patamar mais elevado. Para os ensaios com adição (Figura 2.22-b), nota-se menores variações no coeficiente de atrito nas regiões 1 e 2, sendo que este aparece mais uniforme durante praticamente o dobro do tempo do que nos ensaios sem adição, instante em que o coeficiente de atrito começa a apresentar aumentos abruptos (região 3).

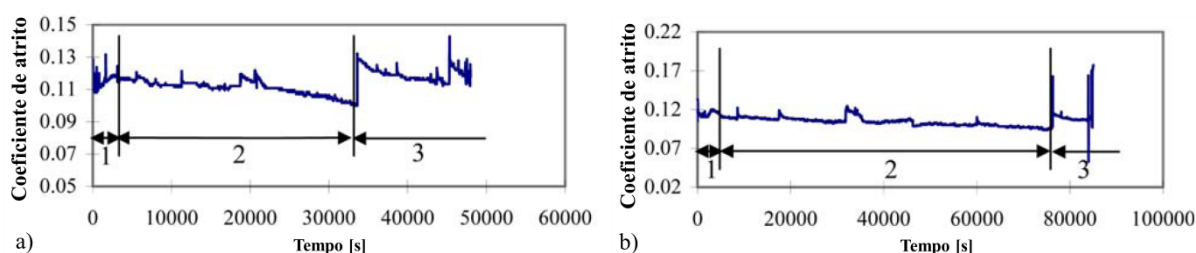


Figura 2.22: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo. (a) Sem adição. (b) Com adição (adaptado de YUAN et al., 2005).

A Figura 2.23 mostra imagens das marcas de desgaste presentes nos materiais utilizados. Nas duas situações os contra corpos apresentaram uma superfície com desgaste abrasivo (Figura 2.23-a e Figura 2.23-c).

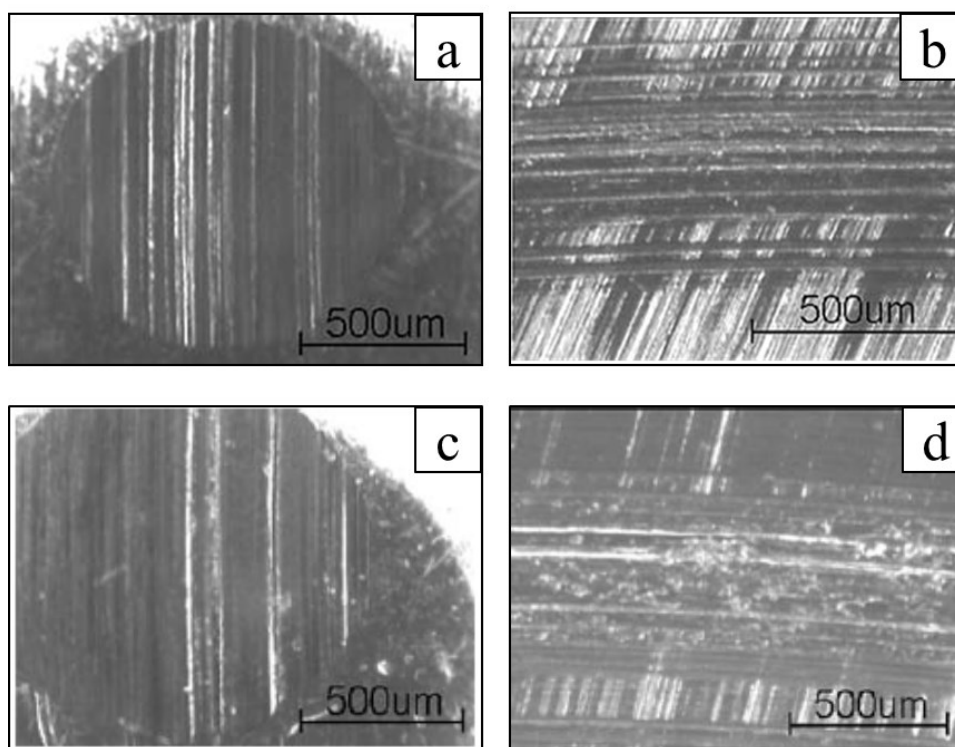


Figura 2.23: Mecanismos de desgaste das esferas e discos ensaiados. (a) e (b) sem adição. (c) e (d) com adição de pó de ferro (adaptado de YUAN et al., 2005).

Observa-se também, que aparentemente pelo tamanho da marca de desgaste do contra corpo utilizado nos ensaios sem adição (Figura 2.23-a), que este sofreu um desgaste menor do que o contra corpo utilizado nos ensaios com adição (Figura 2.23-c). Quando analisados os discos, nota-se que na Figura 2.23-b, a superfície apresenta-se muito sulcada/riscada. Já a condição com adição (Figura 2.23-d) aparentemente sofreu uma menor parcela de desgaste abrasivo, com uma maior adesão de materiais à superfície desgastada, podendo ser uma interação entre as partículas adicionadas e os corpos envolvidos no contato.

Como a dureza do pó de ferro é muito baixa em relação às amostras e contra corpos testados (cerca de 20% da dureza dos corpos em contato), a tendência é de ocorrer um regime de desgaste suave, com deformações elásticas e plásticas das superfícies em contato, podendo resultar em desgaste por adesão e/ou fadiga superficial (ZUM GAHR, 1987). Isto pode explicar o maior tempo de ocorrência do regime permanente de desgaste para os ensaios com adição de pó de ferro (Figura 2.22-b).

No caso do deslizamento de alumínio, os debris foram estudados e caracterizados em termos da estrutura e composição química, tanto via experimental quanto por simulações computacionais, por (KIM; WINDL; RIGNEY, 2007). Os autores concluíram que os debris



não são meramente compostos por óxidos de alumina, mas uma solução sólida parte óxido e parte hidróxido de alumínio.

A Figura 2.24 apresenta uma amostra de debris coletados durante 24 horas de deslizamento, de um par composto por discos de alumínio 99.99% puro, contra esferas de aço inoxidável 440C com 6,35 mm de diâmetro deslizando ao ar, com umidade relativa de 50%, carga normal de 0,49N e velocidade de deslizamento de  $0,027 \text{ m.s}^{-1}$ .

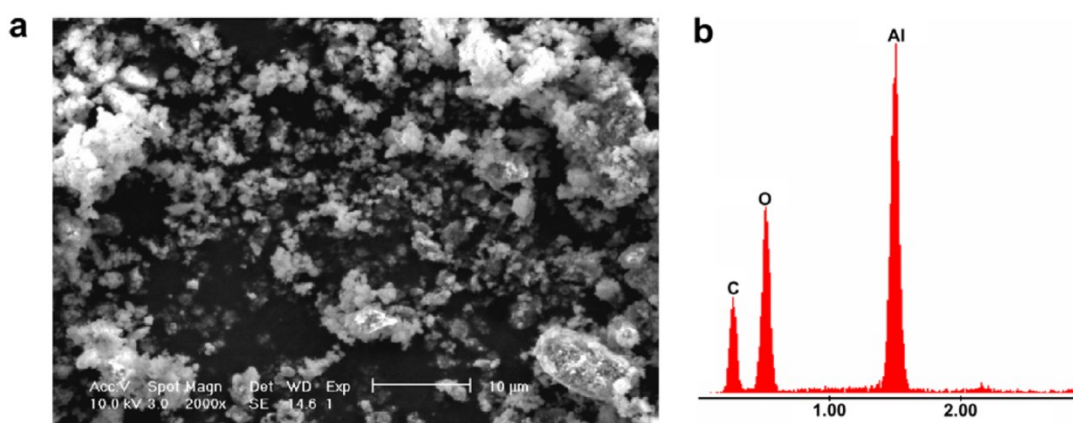


Figura 2.24: Análise dos debris coletados. (a) Imagem de MEV via elétrons secundários. (b) Espectro EDS (KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).

A diferença de tamanhos mostrada na Figura 2.24-a reflete o fato de que os maiores debris são formados nos estágios iniciais do deslizamento enquanto que os menores são formados posteriormente (KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).

O espectro EDS, apresentado na Figura 2.24-b, apresentou uma quantidade significativa de oxigênio e alumínio. O pico de carbono pode ser ignorado, pois segundo os autores, foi originado da fita carbono utilizada para fixar os debris. Uma característica importante foi a quantidade de oxigênio encontrada pelos autores nos debris coletados, onde variou entre 60 e 70%, excedendo a quantidade de oxigênio para a alumina. Os debris maiores, apresentaram quantidades menores de oxigênio, sugerindo que foram formados no início do deslizamento.

Análises via XPS foram feitas para procurar entender melhor como o oxigênio estaria incorporado nos debris de alumínio. Foram comparadas as energias de ligação entre debris gerados após 24h de ensaio, em um ambiente com umidade relativa de 30% e pós de alumínio com alta pureza (Figura 2.25). Cada material apresentou dois picos, sendo um deles para o alumínio metálico ( $\sim 70 \text{ eV}$ ) e um para o alumínio com oxigênio ( $\sim 73 \text{ eV}$ ). No caso do alumínio em pó, o maior pico origina da superfície oxidada. Há uma diferença entre os picos maiores dos dois materiais, sugerindo que o oxigênio está incorporado de uma forma diferente

de como é incorporado na alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), onde a mudança para uma condição de maior energia de ligação estaria relacionada com a presença de hidróxido de alumínio (J.F. MOULDER et al., 1992; SHERWOOD, 1998).

Como as análises via EDS não conseguem detectar o hidrogênio, a quantidade de oxigênio encontrada seria exorbitante, ou seja, quando o hidróxido de alumínio for dominante, as concentrações aparentes de oxigênio poderiam ser na ordem de 75 átomos% (KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).

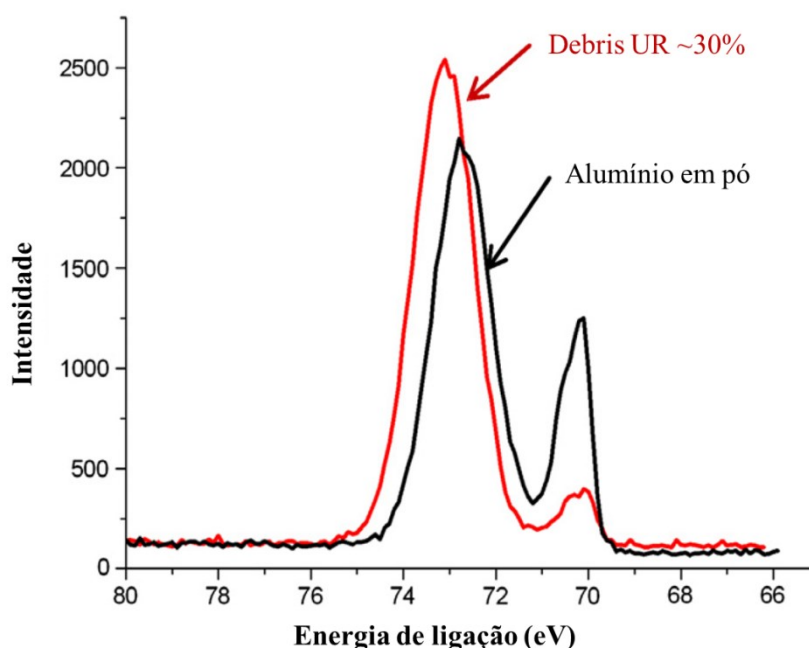


Figura 2.25: Análise XPS dos debris coletados com 30% de umidade e de pós de alumínio com alta pureza (Adaptado de KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).

Como o deslizamento do alumínio estaria então produzindo debris que podem ser hidratados ou hidróxidos de alumínio, o recozimento destes poderia revelar esta premissa. A Figura 2.26 exibe os debris analisados via MEV e EDS antes e após recozimento a 260 °C durante 5 h no vácuo. Os debris antes do recozimento continham aproximadamente 65 at.% de oxigênio. No entanto, após o recozimento esta concentração reduziu para 39 at.%. Além disso, foram feitas também análises via termogravimetria, antes e após aquecimento, mostrada na Figura 2.27.

A redução do peso dos debris quando aquecidos com temperaturas próximas aos 100 °C pode ser atribuída à evaporação de água. Os debris coletados dos ensaios com 30% de umidade perderam cerca de 4% do peso, porém os debris coletados dos ensaios com 95% de

umidade relativa apresentaram uma queda de 25% no peso, onde em uma condição com maior umidade relativa, estes estariam então com uma maior quantidade de água.

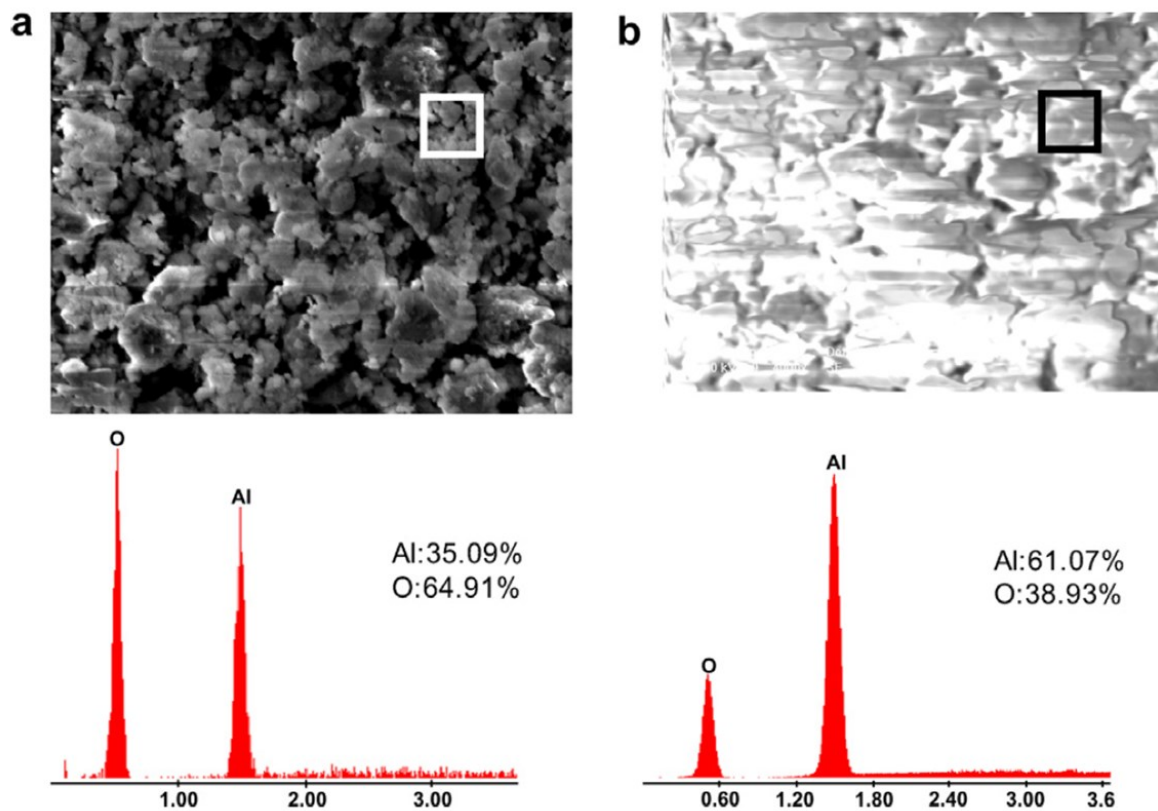


Figura 2.26: Análise dos debris via MEV e EDS dos debris coletados dos ensaios com 30% de umidade. (a) Antes do recozimento. (b) Após o recozimento a 260 °C por 5 horas no vácuo (Adaptado de KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).

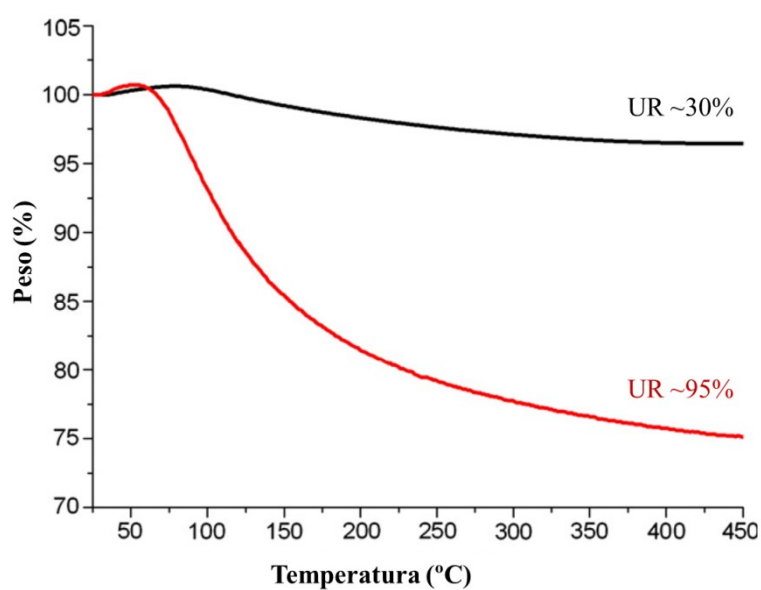


Figura 2.27: Análise dos debris via termogravimetria (Adaptado de KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).

Como comentado anteriormente e mostrado neste capítulo, a literatura é controversa quanto à influência da presença dos debris no comportamento tribológico, pois como mostrado na literatura, eles podem levar ao desgaste abrasivo dos corpos em contato, aumentando o atrito e desgaste, e por outro lado, são fundamentais na formação de tribocamadas protetoras que podem levar a reduções no atrito e desgaste.

Sendo assim, este trabalho visa o estudo sistemático do efeito da presença de debris no comportamento tribológico, estudando tanto a remoção de debris quanto a adição de partículas, em contatos aço-aço e alumínio-aço.

## CAPÍTULO III

### Metodologia

Este capítulo abrange, detalhadamente, as técnicas experimentais e os materiais utilizados.

#### 3.1 - Materiais

Para todos os ensaios realizados neste trabalho, foram utilizados contra corpos esféricos de 10 mm de diâmetro de aço AISI 52100. Sua composição química nominal é mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição química do aço AISI 52100 (porcentagem em peso).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr
Percentual (%)	0,994	0,27	0,32	0,013	0,005	1,49

Inicialmente foram utilizadas amostras de aços ferramenta, preparadas por lixamento até 600 Mesh, para a execução dos pré-testes com remoção de debris (mostrados no Apêndice I).

Após a execução dos pré-testes, foi necessária a instalação de um sistema de tratamento de ar para a realização dos ensaios. Foi utilizado então, outro aço ferramenta, cujas amostras foram retificadas. Para os ensaios com adição de partículas, foram adicionadas partículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , na tentativa de simular uma grande quantidade de debris no contato.

Adicionalmente, foram efetuados ensaios com alumínio comercialmente puro. As amostras foram preparadas através de polimento eletrolítico. Foram efetuados ensaios com remoção de debris e com adição de partículas. Os ensaios com adição foram efetuados com adição de partículas de alumina, com tamanhos de 0,02  $\mu\text{m}$ , 0,05  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 - Métodos

As amostras de aço ferramenta, tanto as utilizadas nos pré-testes quanto as utilizadas nos ensaios com remoção de debris e adição de partículas, foram analisadas quimicamente utilizando-se a técnica de Espectrometria de Emissão Óptica em um equipamento ThermoARL-4460.

A análise da composição química das amostras de alumínio foi realizada usando diferentes equipamentos para aumentar a precisão dos resultados. O carbono (C) foi detectado via Absorção por Infravermelho em um equipamento Leco CS444<sup>®</sup>, o nitrogênio (N) em um equipamento Leco TC436<sup>®</sup> por Condutividade Térmica e os demais elementos foram detectados via Espectrometria de Emissão Óptica em um equipamento ThermoARL 4460, como feito anteriormente para as amostras de aço ferramenta.

A preparação das amostras de aço ferramenta utilizada nos ensaios com remoção de debris e adição de partículas foi através da retificação, utilizando-se uma retífica marca Melo, modelo P36, rotação de 3000 rpm e precisão de 0,02 mm em 600 mm. Para análise da microestrutura utilizou-se da metalografia (utilizando nital 2%) e da microscopia óptica. O equipamento utilizado foi um microscópio óptico Olympus BX51M.

As amostras de alumínio foram polidas via polimento eletrolítico. O polimento eletrolítico foi feito em um equipamento Disa Electropol Mark 5, da marca Struers, utilizando uma solução eletrolítica com 5% de ácido perclórico + 15% de água destilada + 10% de butil glicol + 70% de álcool etílico, durante 20 segundos e com corrente de 2A.

Os ensaios de dureza Vickers foram realizados em um durômetro universal da marca Wolpert, com carga de 20 Kg (196 N) para as amostras de aço ferramenta, e com carga de 10 Kg (98 N) para as amostras de alumínio.

Os ensaios tribológicos foram efetuados em um Tribômetro Universal Plint<sup>®</sup>, modelo TE 67 Plint and Partners LDT no modo alternado, com frequência de oscilação de 2 Hz e amplitude do movimento de 5 mm.

Para este sistema em particular, foi incorporado ao tribômetro um sensor LVDT modelo RS 646-511, para a medição da posição do corpo em relação ao contra corpo em cada ciclo do movimento alternado durante o ensaio. A Figura 3.1-a mostra o modelo esquemático do teste. A aquisição de dados foi feita por uma placa de aquisição modelo NI BNC-2110, ligada a um microcomputador com o software LabVIEW<sup>®</sup>, onde foi feito um programa para tratamento dos dados adquiridos. A análise dos dados foi feita utilizando-se de uma técnica denominada triboscopia, que consiste fundamentalmente na produção de imagens numéricas dos sinais

adquiridos durante o ensaio. Ou seja, uma imagem triboscópica é, na verdade, uma representação tridimensional da variação dos parâmetros físicos em relação ao tempo durante o ensaio de desgaste. Fez-se uma rotina de programação no software MATLAB<sup>®</sup> para a confecção das imagens triboscópicas 3D, a fim de facilitar a visualização e a interpretação dos dados (DOS SANTOS; COSTA; DE MELLO, 2015).

Na Figura 3.1-b um dos eixos mostra a posição sobre a amostra, ou seja, sobre a trilha de desgaste em cada ciclo do movimento alternado, onde cada ciclo é representado por duas linhas na imagem triboscópica, onde uma representa a ida e a outra a volta, e em seguida, a próxima linha representa a ida do próximo ciclo e assim sucessivamente, formando a imagem triboscópica. Outro eixo exibe o número de ciclos, e, por fim, o último eixo, na posição vertical, apresenta a variável medida (coeficiente de atrito, potencial de contato, etc.) em função dos dois primeiros.

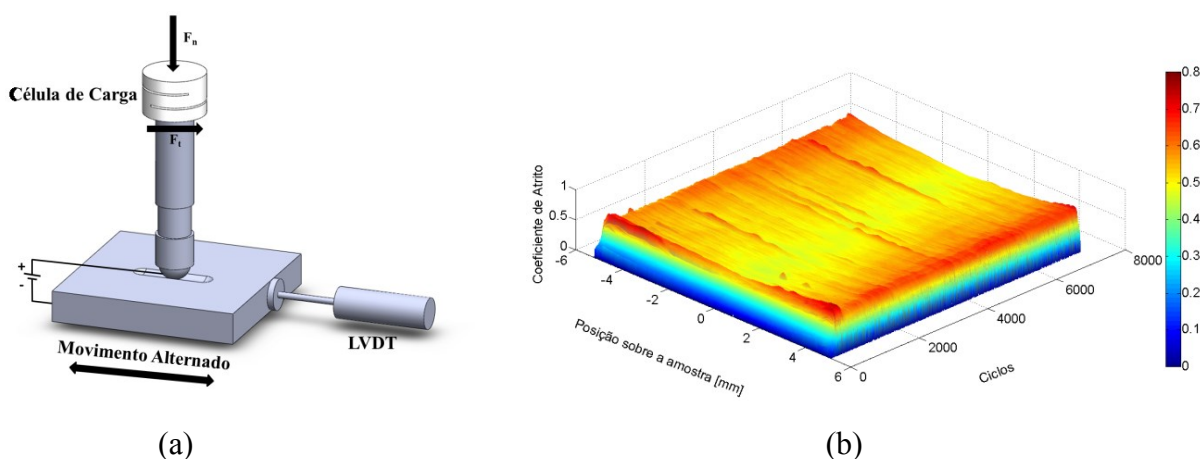


Figura 3.1: Testes tribológicos. (a) Modelo esquemático do teste. (b) Exemplo de uma imagem triboscópica 3D.

Por meio do uso desta técnica, podem-se localizar variações instantâneas, simultaneamente no tempo e na posição, de quaisquer parâmetros triboscópicos monitorados durante um ensaio tribológico. Deste modo, as imagens produzidas pela triboscopia contêm, simultaneamente, os detalhes inerentes às peculiaridades locais, sem perder de vista a evolução global do fenômeno tribológico (BELIN, 1993; BELIN; LOPEZ; MARTIN, 1994; FONTAINE et al., 2004; BOZZI; DE MELLO, 2006).

Para o cálculo do coeficiente de atrito médio do regime permanente, foi escolhido o instante do ensaio onde o coeficiente de atrito passou a apresentar as menores variações, ou seja, quando o coeficiente de atrito se manteve praticamente estável até o fim do ensaio. Foi feita então uma média do vetor de pontos do coeficiente de atrito a partir deste instante.

Para a medição do desgaste nas amostras, usou-se a técnica da interferometria a laser 3D, que foi realizada utilizando-se um equipamento da marca UBM, modelo MESSTECHNIK MicroFocus4, com uma taxa de medição de 300 pontos/s, densidade de pontos de 1000 x 50 pontos/mm, em direções perpendiculares, respectivamente, com área suficientemente grande para abranger toda a marca de desgaste. Para o cálculo do volume desgastado, utilizou-se o programa *Digital Surf Mountains Map Universal*. Após obter-se o volume desgastado, fez-se a divisão deste pela distância deslizada e pela força normal aplicada, obtendo-se a taxa de desgaste ( $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

Para a avaliação da topografia de superfície das amostras e dos contra corpos utilizados nos ensaios, também foi utilizada a técnica da interferometria a laser aliada ao programa *Digital Surf Mountains Map Universal*, usando como parâmetros, uma taxa de medição de 300 pontos/s, uma densidade de pontos de 1000 x 100 pontos/mm e a área medida adotada foi um quadrado de 3 x 3 mm, com *cut-off* definido de 0,8 mm.

Sabe-se que a topografia de superfície exerce muito influência no comportamento tribológico. Sendo assim, em função do grande número de parâmetros existentes para descrever a topografia de uma superfície, (DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013), procuraram selecionar, um número reduzido de parâmetros que juntos pudessem descrever adequadamente as características de uma superfície. Foram selecionados os seguintes parâmetros topográficos: um parâmetro de amplitude ( $S_q$ ), um parâmetro híbrido ( $S_{dq}$ ) e dois parâmetros funcionais ( $S_{pk}$ ) e ( $S_{bi}$ ).

Parâmetros topográficos são quantificações do perfil de rugosidade. A norma ISO 4287 (1997) define os parâmetros de rugosidade bidimensionais. Os parâmetros de rugosidade tridimensionais são extrapolações dos parâmetros bidimensionais, definidos pela norma ISO 25178-2 (2012) e muito conhecidos na literatura (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1992; 1993; FRANCO; SINATORA, 2015).

Os parâmetros tridimensionais são definidos em comparação com o plano médio da superfície, calculado por meio do nivelamento, usando o método dos mínimos quadrados aplicados à superfície medida (DONG; MAINSAIL; STOUT, 1995).

O parâmetro de amplitude  $S_q$  representa a rugosidade superficial quadrática média e é o valor RMS das alturas em relação ao plano médio da superfície, calculado por meio da Equação 3.1 (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).



$$S_q = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N Z_{jk}^2} \quad (3.1)$$

O parâmetro híbrido  $S_{dq}$ , que representa a inclinação média das irregularidades é uma extensão do parâmetro 2D, chamado de inclinação quadrática média, mostrado na Equação 3.2. Quanto menor o valor para este parâmetro, melhor será a refletividade da luz da superfície.

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{j=2}^N \sum_{i=2}^M \left( \frac{z(x_i, y_j) - z(x_{i-1}, y_{j-1})}{\Delta x} \right)^2 + \left( \frac{z(x_i, y_j) - z(x_{i-1}, y_{j-1})}{\Delta y} \right)^2} \quad (3.2)$$

O parâmetro funcional  $S_{pk}$  é uma extrapolação do parâmetro 2D  $R_{pk}$ . O parâmetro  $R_{pk}$  é extraído da curva de Abbott-Firestone e está associado à região que se desgasta nos primeiros contatos relativos entre as superfícies em contato, conforme ilustrado na Figura 3.2.

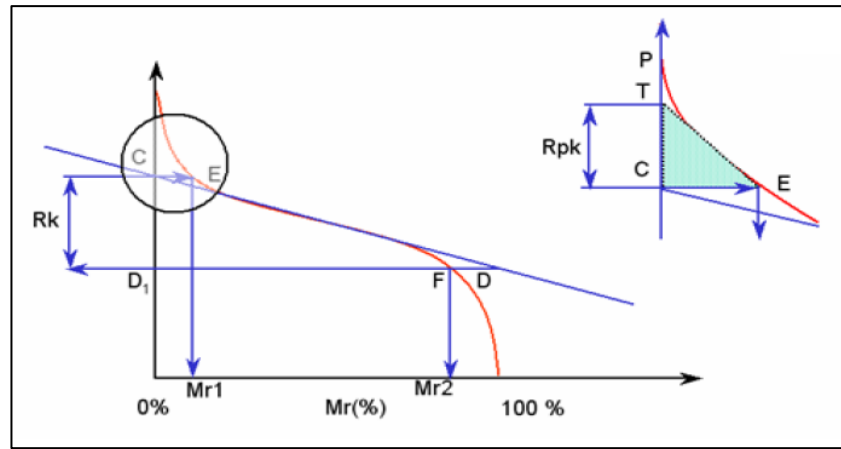


Figura 3.2: Representação gráfica do parâmetro  $S_{pk}$  (TAYLOR HOBSON, 2000).

O parâmetro funcional  $S_{bi}$  representa a capacidade de suporte mecânico da superfície e descreve a superfície em função da variação da raiz quadrática média da superfície, conforme mostrado pela Equação 3.3 (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).

$$S_{bi} = \frac{S_q}{\eta_{0,05}} = \frac{1}{h_{0,05}} \quad (3.3)$$

Onde  $h_{0,05}$  representa uma altura que revela o truncamento de 5% da área total e  $\eta_{0,05}$  é a altura correspondente a 5% da área total (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).

Quanto maior o valor do parâmetro  $S_{bi}$ , maior será a capacidade de suporte mecânico da superfície. Durante o processo tribológico na transição da superfície sem desgaste para a superfície desgastada, ocorre, geralmente, a elevação do parâmetro (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).

Para a medição do desgaste do contra corpo, utilizou-se da microscopia óptica. O equipamento utilizado foi o microscópio Olympus BX51M. Após a aquisição das imagens, utilizando do software do próprio microscópio, Stream Essentials<sup>®</sup>, realizou-se a medição de dois diâmetros perpendiculares, e fez-se então a média resultando no valor do diâmetro médio da calota esférica (2a). Com o diâmetro da calota, pode-se calcular seu volume ( $V_{calota}$ ), de acordo com as Equações 3.4 e 3.5, cujo modelo é mostrado na Figura 3.3. Após o cálculo do volume desgastado, obtém-se a taxa de desgaste como mencionado anteriormente para o corpo.

$$h = r - \sqrt{r^2 - a^2} \quad (3.4)$$

$$V_{calota} = \frac{1}{3}\pi h^2(3r - h) \quad (3.5)$$

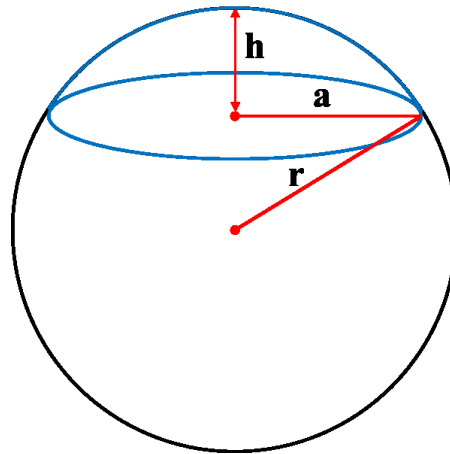


Figura 3.3: Modelo esquemático de uma calota esférica. Onde: “h” é a altura da calota esférica; “a” é o raio da calota esférica e “r” é o raio da esfera.

Os mecanismos de desgaste nos corpos ensaiados e os debrís foram analisados via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nos equipamentos: VEGA3 TESCAN e ZEISS EVO MA10 e também por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), utilizando-se de um equipamento da marca OXFORD INSTRUMENTS, modelo 51-ADD0007.

Para os pré-testes, foi montado um sistema de remoção de debris via ar comprimido na tentativa de retirar os debris gerados durante o ensaio. Os pré-testes foram efetuados com duração de 30 minutos e com carga normal de 22 N.

Os pré-testes com remoção de debris foram efetuados utilizando um compressor Hydrovane, modelo 501-PURS, com pressão controlada (8 bar) durante todo o ensaio. Foi utilizada uma agulha com 1,2 mm de diâmetro visando uma alta velocidade de saída de ar, com a intenção de aumentar a eficiência na retirada dos debris da trilha de desgaste, conforme esquema ilustrado pela Figura 3.4. Adicionalmente foram efetuados ensaios sem o sistema de remoção, para serem usados como referência.

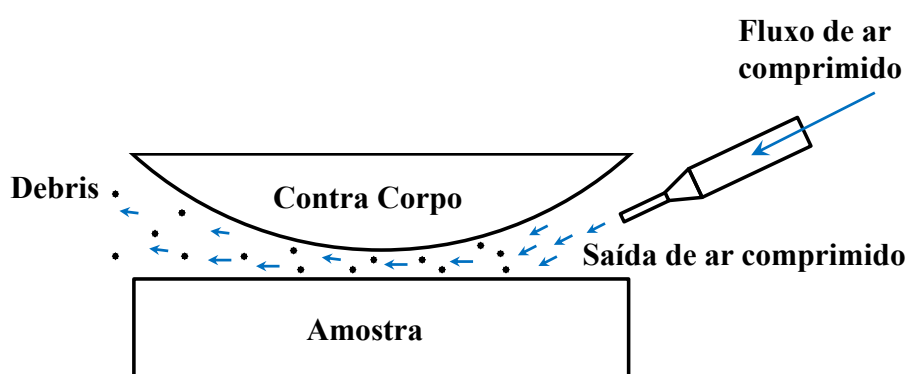


Figura 3.4: Esquema ilustrativo do sistema de remoção dos debris.

Após os pré-testes, com a intenção de eliminar potenciais impurezas existentes no contato tribológico, foi instalado um sistema de secagem e filtragem de ar comprimido. Foi instalado um secador de ar industrial da marca CompAir, modelo CRD-II-0020 juntamente com dois filtros coalescentes também da mesma marca sendo: um pré filtro com retenção de particulados de até  $1\ \mu\text{m}$  e com óleo residual máximo de  $0,5\ \text{mg/m}^3$ , e um pós filtro com retenção de particulados de até  $0,01\ \mu\text{m}$  e com óleo residual máximo de  $0,01\ \text{mg/m}^3$  de ar.

Os ensaios foram efetuados com carga normal constante de 22 N, aplicada via peso morto, durante 60 minutos, para as 03 repetições ensaiadas para cada condição. Foi variada também a pressão na saída de ar comprimido, onde foram utilizadas duas pressões: 8 bar (máxima pressão oferecida pelo compressor) e 4 bar (sistema em meia carga).

Adicionalmente foram feitos também ensaios com adição de partículas em excesso, ou seja, de forma a encobrir todo o contato, na tentativa de entender melhor a influência de partículas no comportamento tribológico, mantendo os mesmos parâmetros utilizados para os ensaios com remoção de debris. Foram adicionadas partículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , na tentativa de simular uma grande quantidade de debris no contato. A Figura 3.5 mostra um fluxograma

dos ensaios realizados em aços ferramentas, onde em azul são destacados os pré-testes que serão mostrados no Apêndice I.

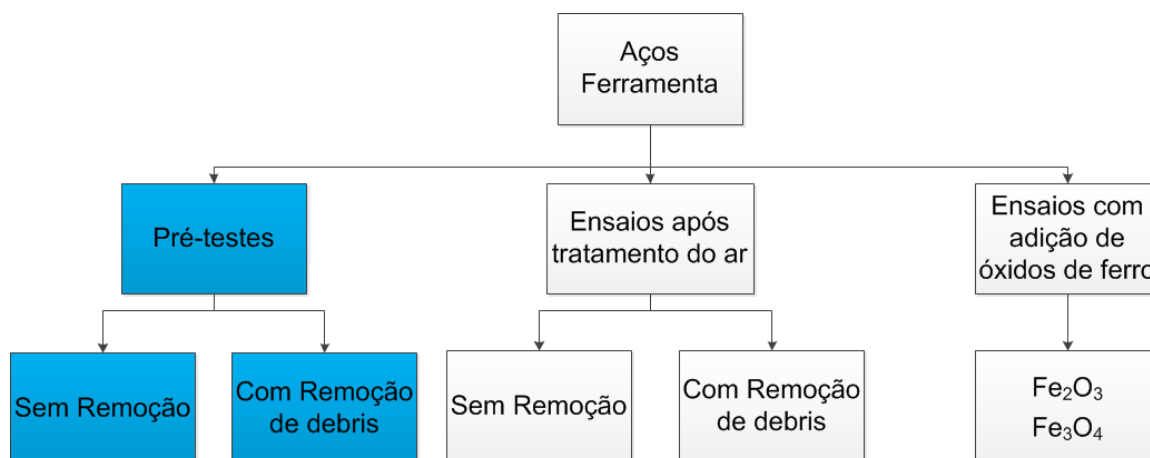


Figura 3.5: Fluxograma dos ensaios realizados nos aços ferramenta.

Foram realizados também ensaios em alumínio comercialmente puro, com a intenção de simular os debris presentes neste contato. Foram realizados ensaios com remoção de debris e com adição de partículas. Inicialmente foram realizados ensaios secos. Para estes ensaios, foi utilizada uma carga normal de 7 N e com duração de 30 minutos, para as 4 repetições executadas para cada condição. Foram adicionadas partículas de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com tamanhos de 0,05  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ .

Adicionalmente, foram feitos ensaios com adição controlada de partículas, na tentativa de simular apenas a quantidade que estaria presente no contato. Para estes ensaios foram usadas  $\sim 1$  mg de partículas de alumina com tamanhos de 0,02  $\mu\text{m}$  (20 nm) e 3  $\mu\text{m}$ . As partículas foram pesadas em uma balança da marca Ohaus, modelo AS120S, com precisão de 0,1 mg.

Após os resultados dos ensaios secos com adição de partículas, procurou-se uma condição que contribuísse para um melhor direcionamento das partículas para o contato. Decidiu-se usar então, soluções aquosas com partículas de alumina, como veículo para as partículas para o contato, na tentativa de simular a hidratação dos debris de desgaste, como observado por (KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).

Para os ensaios em solução aquosa foi usada uma carga normal de 7 N e o tempo de duração dos ensaios foi de 30 minutos, para as 04 repetições realizadas para cada condição. Foi usada uma solução de água destilada + alumina, na concentração de 2% em peso de alumina em solução. Foram testados 4 tamanhos diferentes de partículas: 0,05  $\mu\text{m}$ , 0,1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ , na tentativa de se observar a influência do tamanho das partículas adicionadas no comportamento tribológico. Os ensaios tomados como referência foram nomeados de

RAD e foram feitos apenas com água destilada. Todos os ensaios foram feitos submersos, em um porta amostra tipo cuba, sem retroalimentação.

Após o término dos ensaios RAD, fez-se a coleta de todo o fluido da cuba e, em seguida, levado a uma centrífuga, para separação dos particulados da solução líquida para posterior secagem à temperatura ambiente e análise via MEV-EDS e análise granulométrica. A distribuição granulométrica dos debris gerados no desgaste foi analisada usando um microscópio CETI Inverso TC-100. As partículas foram medidas através de aquisição de imagens, através do programa *Expert Shape*. Os debris foram analisados também via MEV e EDS.

Adicionalmente foram efetuados ensaios com variação da concentração de partículas na solução. Foram usadas concentrações de 10% em peso e 40% em peso, para comparação com as condições RAD e 2% em peso. As condições dos ensaios foram as mesmas utilizadas anteriormente para os outros ensaios com alumínio. Para estes ensaios, a medição do volume desgastado nas amostras foi efetuada utilizando-se de um perfilômetro 3D, com apalpador mecânico, com raio de ponta de 5  $\mu\text{m}$ , do fabricante Hommel-Werke, modelo T8000<sup>®</sup>, utilizando-se de uma densidade de pontos de 800 x 30 pontos/mm, com área suficientemente grande para abranger toda a marca de desgaste. Para o tratamento dos dados foi utilizado o programa *Digital Surf Mountains Map Universal*. A Figura 3.6 mostra um fluxograma dos ensaios realizados em alumínio comercialmente puro.

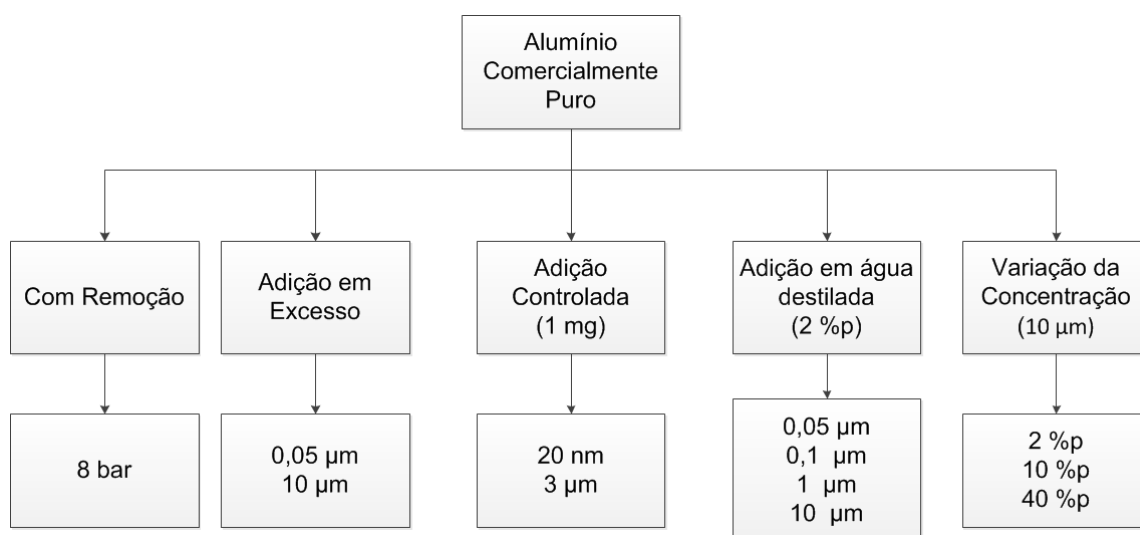


Figura 3.6: Fluxograma dos ensaios realizados em alumínio comercialmente puro.

## CAPÍTULO IV

### Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta os resultados e as discussões dos diferentes ensaios executados a fim de entender a influência dos debris no comportamento tribológico. Para isso, foram efetuados ensaios sem a presença de debris, chamados ensaios com remoção e também ensaios com adição de partículas, com o objetivo de entender como o tipo, quantidade e tamanho das mesmas poderiam influenciar no comportamento tribológico.

#### 4.1 - Efeito da remoção de debris e adição de partículas de óxidos de ferro em ensaios com aço ferramenta.

Após a execução dos pré-testes, mostrados no Apêndice I, foi instalado um sistema de tratamento de ar comprimido com a intenção de eliminar potenciais impurezas existentes no contato tribológico. Os ensaios foram realizados em amostras de aço ferramenta retificados.

A Figura 4.1 retrata a microestrutura típica dos contra corpos que foram utilizados em todos os ensaios, onde se pode verificar que sua estrutura é martensítica revenida. Testes de dureza Vickers resultaram em valores de  $772 \pm 5 \text{ Kgf/mm}^2$ .

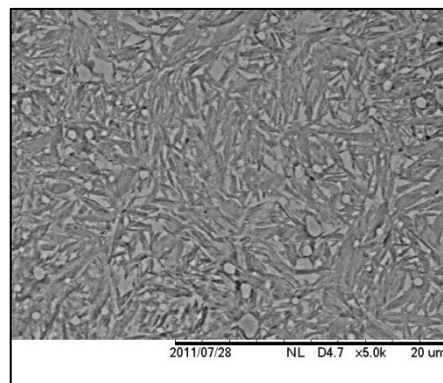


Figura 4.1: Microestrutura do contra corpo.

A microestrutura do aço ferramenta que foi utilizado nos ensaios após a instalação do sistema de tratamento de ar comprimido é apresentada na Figura 4.2. Nota-se que sua estrutura é predominantemente martensítica, assim como encontrado para o outro aço ferramenta utilizado nos pré-testes, porém com uma estrutura aparentemente mais refinada. Testes de dureza Vickers efetuados nestas amostras apresentaram valores de  $611 \pm 30$  Kgf/mm<sup>2</sup>.

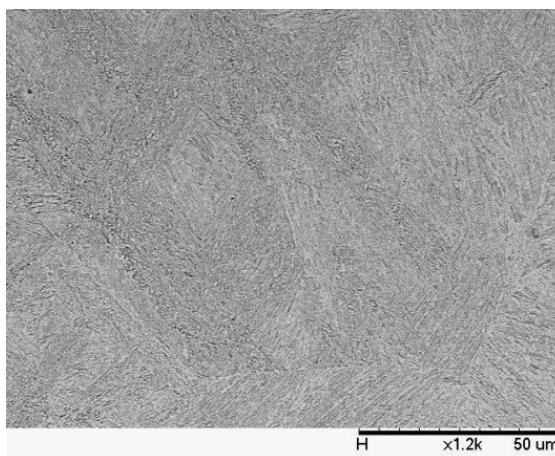


Figura 4.2: Aço ferramenta usado nos ensaios após o tratamento do ar comprimido.

A composição química do aço ferramenta é apresentada na Tabela 4.1. Nota-se que além do maior teor de carbono, é um aço com maiores teores de outros elementos de liga, como manganês, níquel, molibdênio e principalmente o cromo com 4,5%, justificando os valores de dureza Vickers encontrados para o mesmo na ordem de 600 Kgf/mm<sup>2</sup>.

Tabela 4.1- Composição química do aço ferramenta.

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	P	S
<b>%p Mín.</b>	0,76	0,1	0,5	4,3	-	0,11	-	-	-	-
<b>%p Máx.</b>	1,05	0,45	0,8	4,7	0,35	0,39	0,15	0,1	0,025	0,025
<b>%p Medido</b>	0,86	0,27	0,6	4,5	0,13	0,22	0,0007	0,0705	0,012	0,009

A Figura 4.3 apresenta a topografia de superfície analisada via interferometria laser para a amostra de aço ferramenta retificado, onde o processo de retificação pareceu contribuir para uma topografia com uma maior quantidade de riscos, porém com menor profundidade, quando comparado com os valores encontrados para as amostras utilizadas nos pré-testes (Apêndice- Figura AI.3). Já a superfície dos contra corpos utilizados (Figura 4.4) apresenta uma aparência mais lisa, como mostrado pelo detalhe com maior ampliação representado pela seta preta.

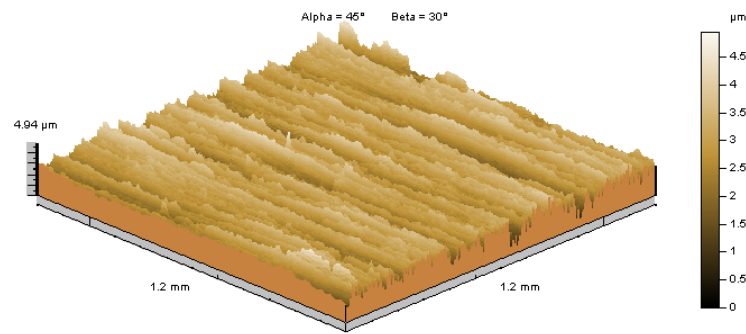


Figura 4.3: Mapa topográfico típico das amostras de aço ferramenta.

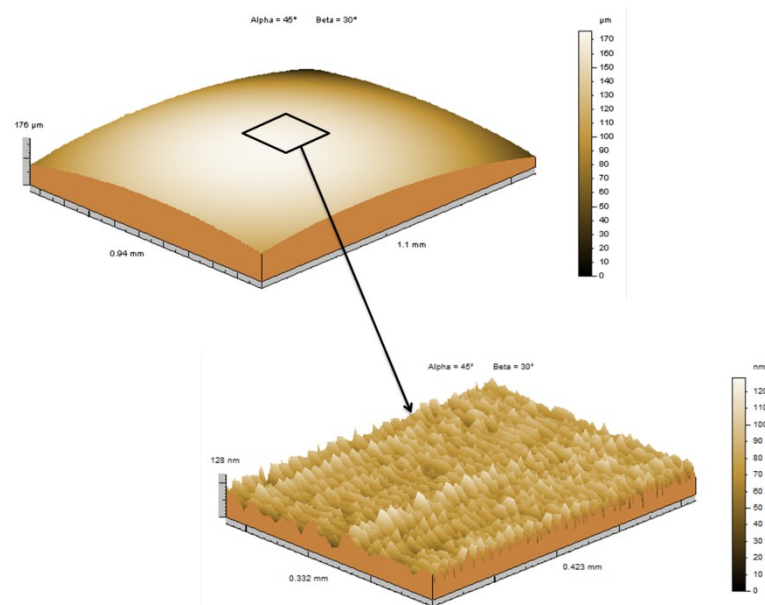


Figura 4.4: Mapa topográfico do contra corpo.

A Figura 4.5 mostra os parâmetros topográficos para o contra corpo e para o aço ferramenta. Como ressaltado anteriormente na Figura 4.3 e na Figura 4.4, os contra corpos apresentaram uma superfície muito lisa quando comparados com as amostras. Os parâmetros topográficos refletem essa afirmação, uma vez que quando analisados os parâmetros da rugosidade quadrática média ( $S_q$ ), da altura dos picos da superfície ( $S_{pk}$ ) e da inclinação média das irregularidades ( $S_{dq}$ ), nota-se que o valor apresentado pelas amostras é cerca de uma ordem de grandeza maior que os apresentados pelos contra corpos, enquanto que os valores da capacidade de apoio ( $S_{bi}$ ) apresentaram valores cerca de duas vezes maiores para as amostras.



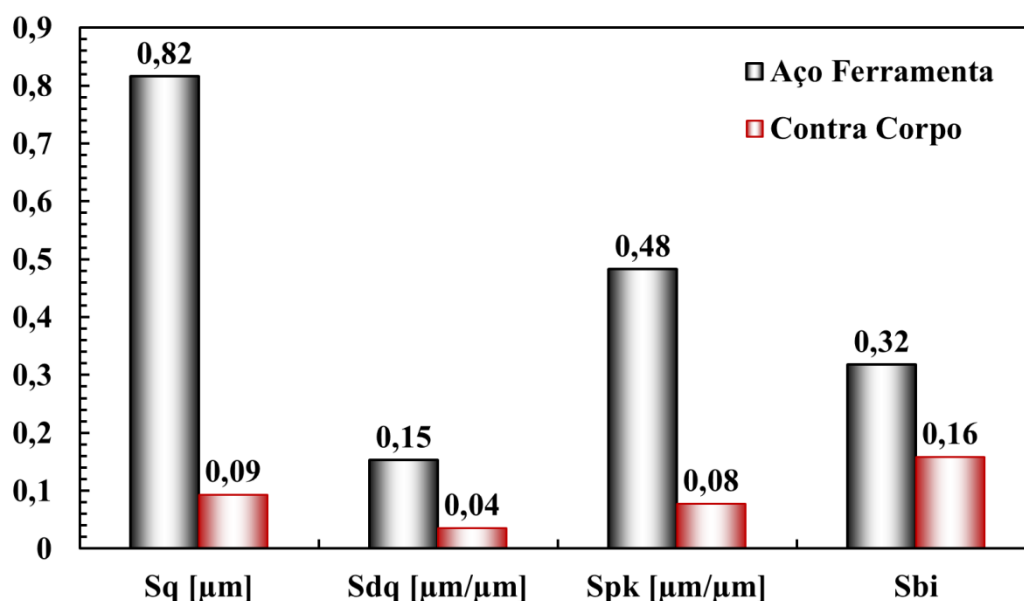


Figura 4.5: Parâmetros topográficos dos materiais usados ensaios.

Os testes de deslizamento alternados foram efetuados com variação da pressão na saída de ar comprimido, onde foram utilizadas duas pressões: 8 bar (máxima pressão oferecida pelo compressor) e 4 bar (sistema em meia carga). Os ensaios foram efetuados com carga normal constante de 22 N, durante 60 minutos. Os ensaios sem remoção de debris foram nomeados de ensaios referência.

Na Figura 4.6, nota-se que o coeficiente de atrito apresenta-se maior na fase inicial de todos os ensaios, porém para os ensaios com remoção dos debris (Figura 4.6-b, Figura 4.6-c) este valor maior apresentado para o coeficiente de atrito se mantém até cerca de 2000 ciclos, tanto se utilizando do sistema de ar comprimido na maior pressão (8 bar), quanto em uma pressão intermediária (4 bar). Porém, no decorrer dos ensaios os valores apresentaram uma estabilização, seguida de uma convergência nos valores apresentados para todas as condições. Este comportamento pode ser observado também na Figura 4.7 que mostra o coeficiente de atrito médio por ciclo, onde notam-se comportamentos semelhantes aos mostrados na Figura 4.6.

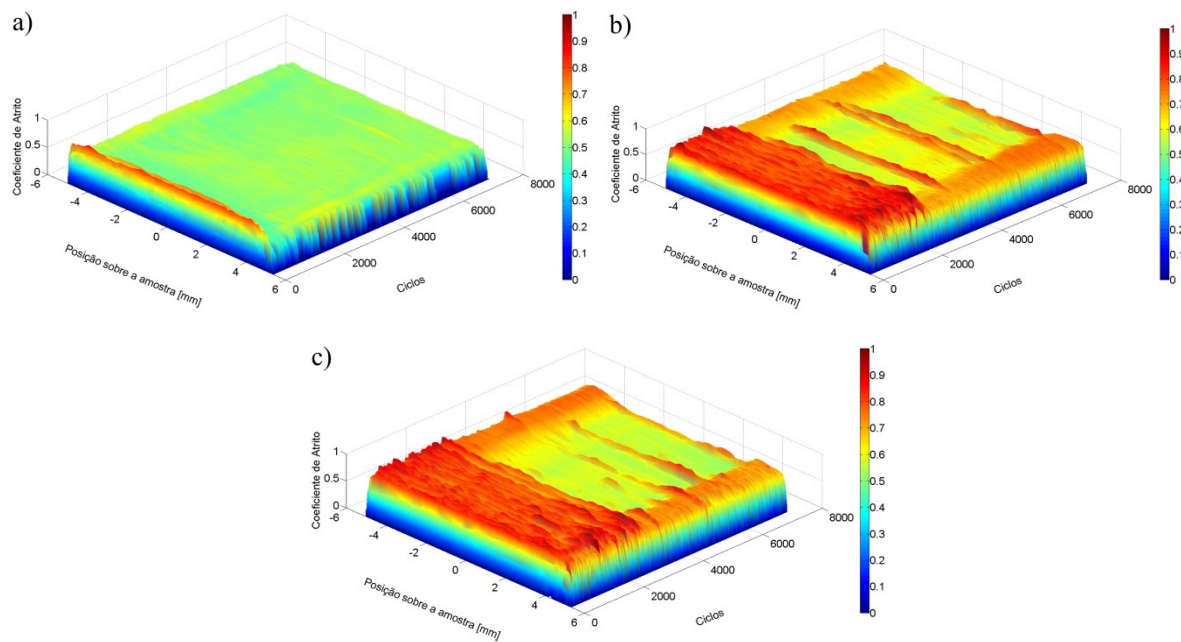


Figura 4.6: Evolução do coeficiente de atrito. (a) Referência, (b) Remoção a 4bar e (c) Remoção a 8bar.

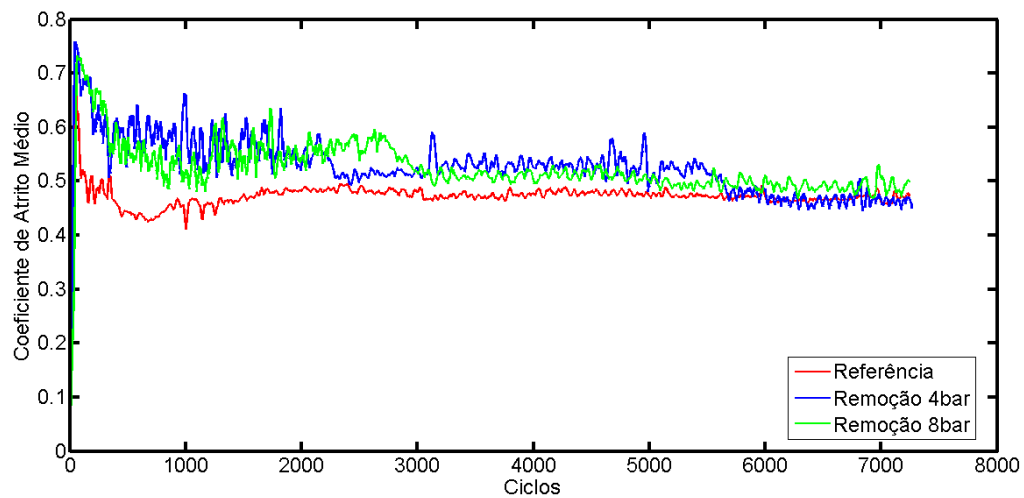


Figura 4.7: Coeficiente de atrito médio por ciclo.

Identifica-se ainda na Figura 4.7 que a diferença no comportamento do coeficiente de atrito no início dos ensaios (até 2000 ciclos), onde os ensaios com remoção apresentaram um coeficiente de atrito maior (cerca de 20%). Diante disso, foram executados ensaios chamados interrompidos, onde os mesmos foram executados com as mesmas condições dos anteriores, exceto, a duração, que foi de 10 minutos (1200 ciclos), a fim de tentar entender a causa desta diferença no coeficiente de atrito. A Figura 4.8 ilustra um comparativo das marcas de desgaste para todas as condições ensaiadas até 1200 ciclos.

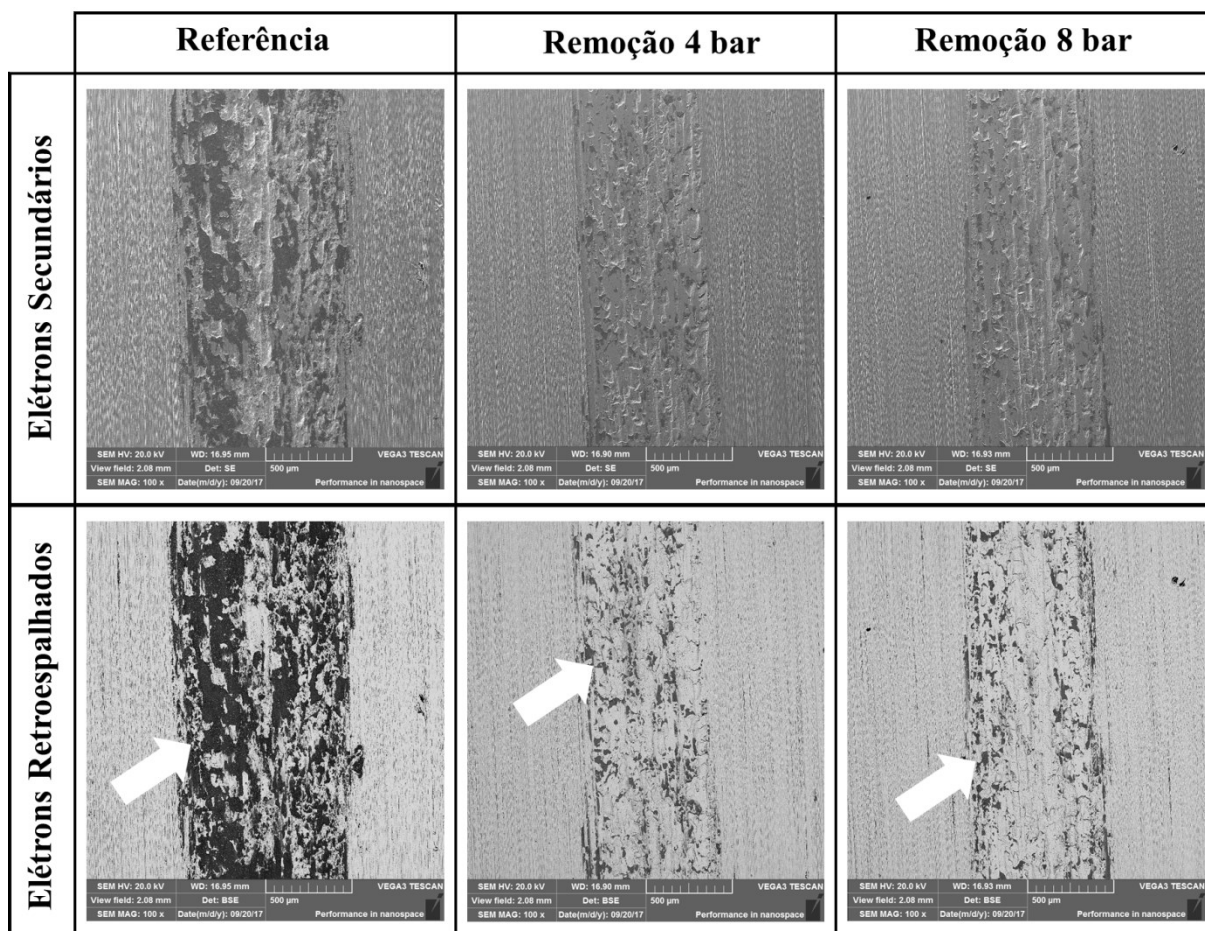


Figura 4.8: Comparativo entre as marcas de desgaste para os ensaios interrompidos em 1200 ciclos.

As marcas de desgaste mostram claramente a diferença na quantidade de tribocamadas formadas (setas brancas) para os ensaios referência e também quando removidos os debris, onde esta quantidade de tribocamadas decresce significativamente. Os debris são fundamentais na formação de tribocamadas, e na ausência deles, esta formação é prejudicada, levando a aumentos no coeficiente de atrito. De fato, a literatura mostra que a presença dos debris é fundamental para a formação de tribocamadas como reportado, por exemplo, por (BARRAU et al., 2007; HARRIS et al., 2015). A literatura é consensual que em vários sistemas envolvendo o desgaste de metais, os debris podem sofrer grandes deformações e fragmentações (CHEN, 1990; JIANG; STOTT; STACK, 1998; SALVARO et al., 2016). Alguns desses debris fragmentados podem se agrupar em conjuntos formando aglomerados, se associando a vales ou depressões gerados por destacamentos anteriores de outros debris e, à medida que o deslizamento avança, eles são posteriormente comprimidos e compactados e podem ser sinterizados em conjunto, formando camadas sólidas (JIANG; STOTT; STACK, 1998).

O coeficiente de atrito médio para o regime permanente é ilustrado na Figura 4.9. Os ensaios com remoção de debris apresentaram coeficientes de atrito médios em torno de 10% maiores. Análises via ANOVA usando o software Statistica evidenciaram que as condições com 4 bar e 8 bar não revelaram diferenças nos valores de coeficiente de atrito com 95% de confiabilidade. Esta tendência a aumentar o coeficiente de atrito com a remoção dos debris se mostra controversa na literatura, onde vários autores reportaram uma redução no coeficiente de atrito em até duas vezes com a remoção dos debris provavelmente devido às ações abrasivas (VIÁFARA; SINATORA, 2011) e ao maior gasto energético na movimentação destes (SHEASBY; VANDERGEEST, 1981; USMANI; SAMPATH, 1999).

Por outro lado, Halliday e Hirst (HALLIDAY; HIRST, 1956), identificaram que a remoção dos debris em um contato por “*fretting*” resultou em uma diminuição no coeficiente de atrito, onde os debris poderiam agir como micro-rolamentos, reduzindo o coeficiente de atrito. Porém este comportamento poderia ser mais difícil de ocorrer em um contato por deslizamento alternado devido ao maior deslocamento dos corpos, onde provavelmente as ações abrasivas e também os maiores gastos energéticos na movimentação dos debris assumiriam um papel mais importante, aumentando o coeficiente de atrito.

Foram feitos também perfis transversais das marcas de desgaste via interferometria laser, para avaliar a área da seção transversal da marca de desgaste. A Figura 4.10 ilustra estes perfis. Quando removidos os debris, tanto com a maior pressão do sistema (8bar) ou em meia carga (4bar) os resultados apresentaram um maior desgaste sendo ambos, uma ordem de grandeza maior, que quando não são removidos os debris.

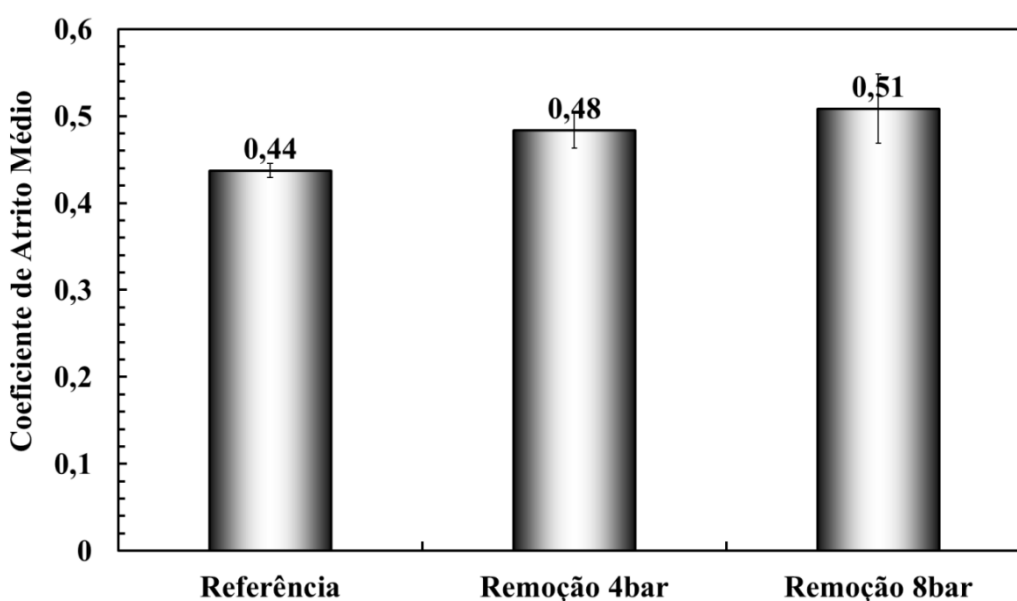


Figura 4.9: Coeficiente de atrito médio no regime permanente.

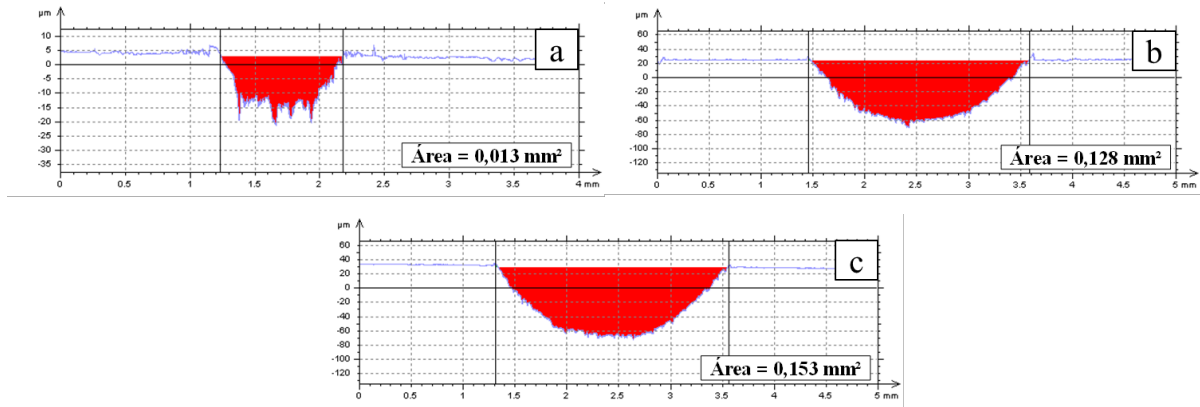


Figura 4.10: Perfis transversais das marcas de desgaste. (a) Referência, (b) Remoção a 4bar e (c) Remoção a 8bar.

Como comentado anteriormente, a remoção dos debris poderia estar impedindo a formação de tribocamadas protetoras podendo levar a um aumento no atrito e no desgaste, visto que a presença dos debris é fundamental para a formação de tribocamadas, como pode ser observado na Figura 4.12 e na Figura 4.13, que mostram imagens por MEV e análises via EDS, para as condições referência e com remoção respectivamente.

A Figura 4.11 ilustra os potenciais de contato típicos para os ensaios com remoção e referência. Quando removidos os debris há uma queda significativa no potencial de contato, indicando um maior contato metal-metal, podendo indicar que não há formação de tribocamadas protetoras, diferentemente do ocorrido para os ensaios referência.

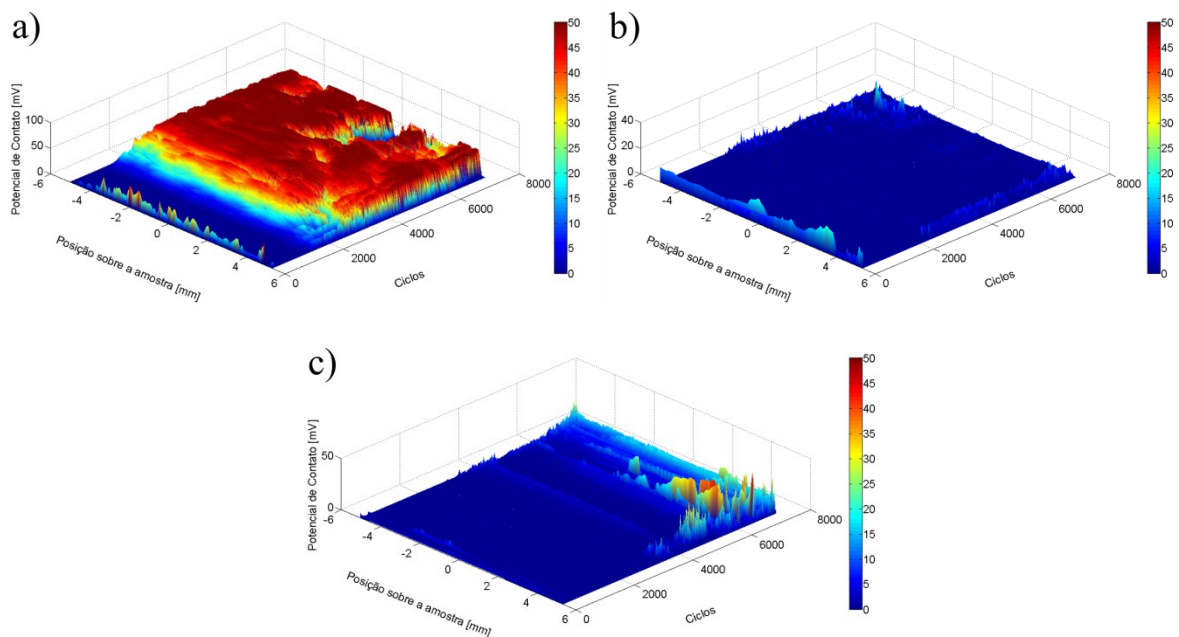


Figura 4.11: Potencial de contato. (a) Referência, (b) Remoção a 4bar e (c) Remoção a 8bar.

Na Figura 4.12-a e na Figura 4.12-b nota-se a presença de tribocamadas espessas (setas brancas) e aglomeradas. Análises via EDS (Figura 4.12-c e Figura 4.12-d) evidenciaram que essas camadas são formadas basicamente de oxigênio e ferro, com traços de cromo. Ainda na Figura 4.12-a percebe-se grandes deformações plásticas (setas azuis) e uma competição entre formação e destacamento das tribocamadas formadas, ficando estas depositadas nos interiores dos vales oriundos do desgaste (este último percebe-se melhor na Figura 4.12-b, identificado pelas setas vermelhas).

Na Figura 4.13-a e na Figura 4.13-b a presença de tribocamadas (setas brancas) se mostrou menos intensa do que para os ensaios referência. As tribocamadas se mostraram mais espalhadas, em formas de ilhas e em menor quantidade do que as apresentadas pela referência, resultando em aumentos nas taxas de desgaste, como reportado por (LEHEUP; PENDLEBURY, 1991). Análises via EDS (Figura 4.13-c e Figura 4.13-d) evidenciaram grandes quantidades de oxigênio e ferro. Cromo também foi encontrado, em menores quantidades, como para a referência. A remoção dos debris estaria impedindo a formação de tribocamadas protetoras, resultando em um aumento no desgaste.

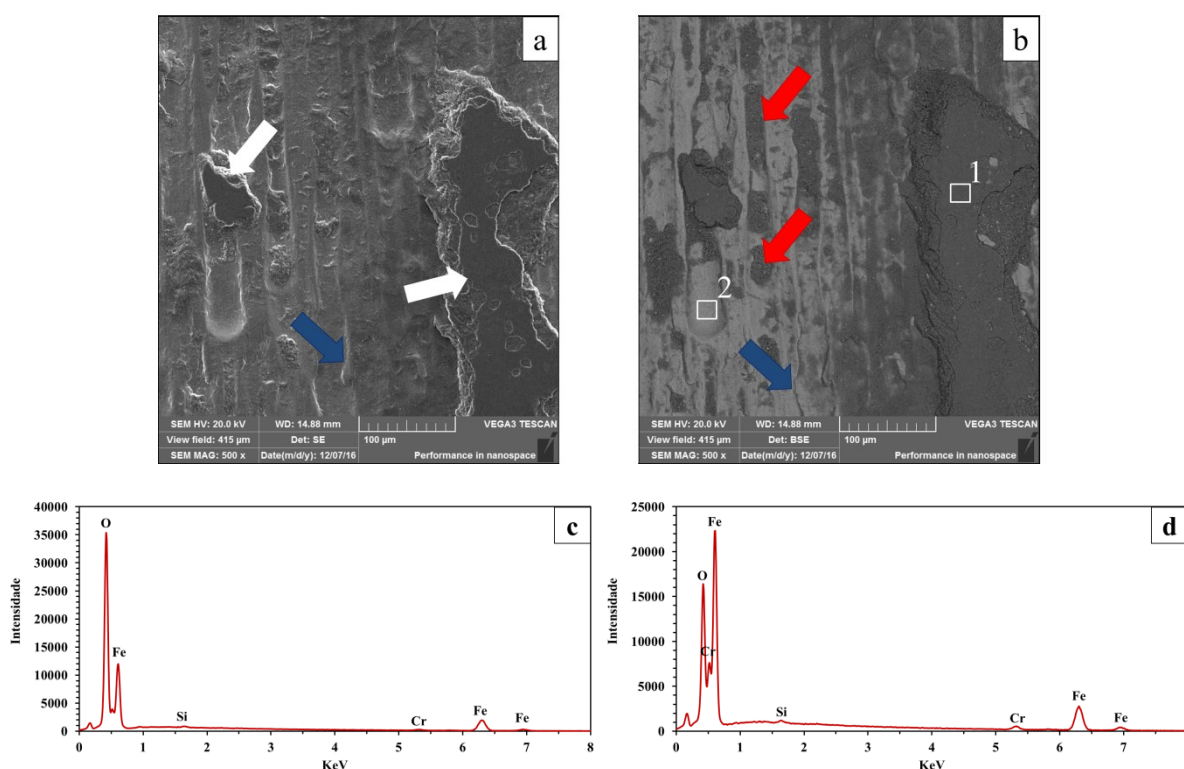


Figura 4.12: Análise via MEV-EDS típica para a amostra de referência. (a) Imagem por elétrons secundários (b) Imagem por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2.



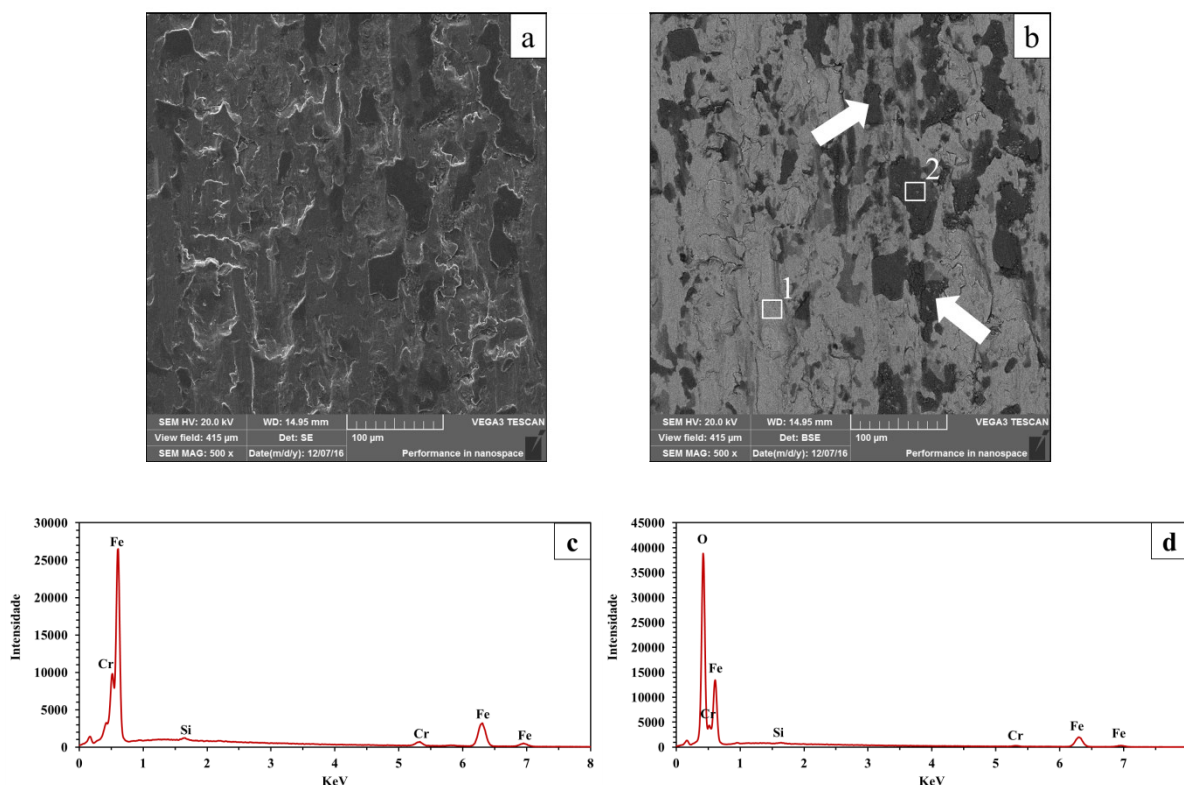


Figura 4.13: Análise via MEV-EDS – Típico para Remoção 4bar e 8bar. (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2.

Portanto não se pôde observar uma influência significativa na redução do coeficiente de atrito e desgaste quando removidos os debris, contrariando os resultados encontrados anteriormente nos pré-testes. A redução encontrada nos pré-testes resultou, muito provavelmente, devido à contaminação do ar comprimido, como apresentado e analisado anteriormente.

A literatura, como comentado anteriormente, mostra que alguns autores reportaram quedas de até duas vezes no coeficiente de atrito quando removidos os debris do contato (SHEASBY; VANDERGEEST, 1981; VIÁFARA; SINATORA, 2011), enquanto que outros defendem que os debris são importantes para a formação de tribocamadas e assim contribuir para reduções no coeficiente de atrito e desgaste (BARRAU et al., 2007; HARRIS et al., 2015).

É importante ressaltar que os debris são parte fundamental na formação das tribocamadas e que a ausência deles resulta em uma menor formação de tribocamadas, como evidenciado pelos resultados anteriores, (Figura 4.8 e Figura 4.13) resultando em altas taxas de desgaste.

Viáfara e Sinatora (VIÁFARA; SINATORA, 2011), além de defenderem uma queda no coeficiente de atrito, também reportaram uma menor formação de tribocamadas quando removidos os debrís do contato e um maior aparecimento de deformações plásticas nas superfícies em contato, que poderiam levar a um aumento no desgaste (os autores não reportaram análises das taxas de desgaste dos ensaios em questão).

Diante disso, procurou-se outro modo de se estudar a influência dos debrís no comportamento tribológico, que é a adição de partículas no contato. A vantagem deste modo em relação à remoção dos debrís é, sem dúvida, a possibilidade do controle das partículas adicionadas, onde se tem o controle da quantidade adicionada, do tipo, do tamanho e da forma das mesmas. Este controle seria dificilmente conseguido na remoção, devido à grande dificuldade em se remover do contato, por exemplo, apenas os maiores debrís, ou apenas os menores.

Sendo assim, foram feitos ensaios não lubrificados com adição de partículas de óxidos de ferro, na tentativa de entender melhor a influência de partículas no comportamento tribológico. Foram adicionadas partículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , em excesso, ou seja, de forma a se conseguir que a maior quantidade possível deles entrasse no contato. Para isso, foi utilizado um porta amostra em forma de cuba e neste após a montagem da amostra e posicionamento do contra corpo, foram adicionadas as partículas até o completo enchimento da cuba.

A Figura 4.14 exibe detalhes das partículas adicionadas ao contato. As partículas utilizadas neste trabalho foram as mesmas utilizadas por (DA SILVA; BINDER; DE MELLO, 2005). A distribuição granulométrica apresentada mostra que para o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Figura 4.14-a) a maior frequência de ocorrência do diâmetro se encontra entre  $0,7\ \mu\text{m}$  e  $1,4\ \mu\text{m}$ , com diâmetro médio de  $0,92\ \mu\text{m}$ .

Já para o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Figura 4.14-b) a maior quantidade se encontra na faixa de diâmetros entre  $4\ \mu\text{m}$  e  $14\ \mu\text{m}$ , apresentando um diâmetro médio de  $5,99\ \mu\text{m}$ . Segundo a literatura, o valor da dureza Vickers para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é  $1308\ \text{Kgf/mm}^2$  (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005). Já para  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , os valores de dureza Vickers, variam entre  $370\text{-}600\ \text{Kgf/mm}^2$  (HUTCHINGS, 1992; WILLIAMS, 1994).



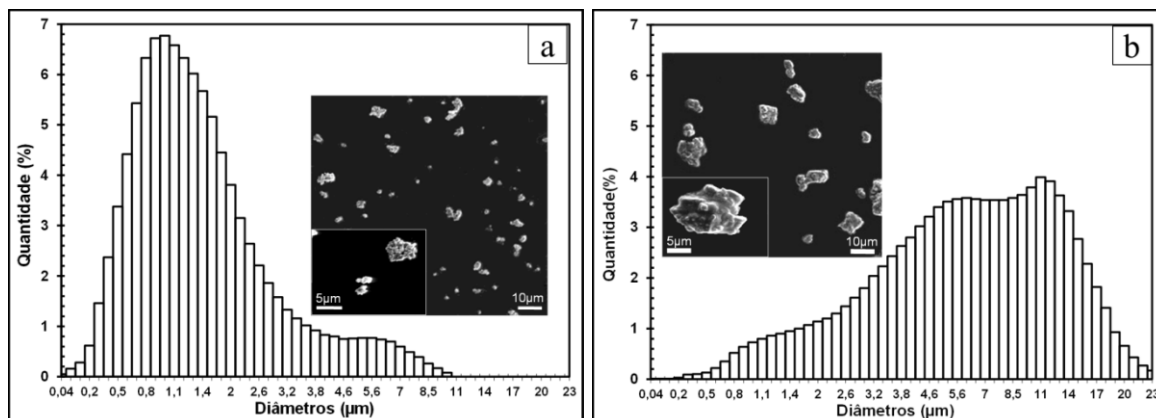


Figura 4.14: Distribuição granulométrica. (a)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , (b)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Adaptado de (DA SILVA; BINDER; DE MELLO, 2005).

Os ensaios foram executados com os mesmos parâmetros e também nos mesmos materiais utilizados nos ensaios com remoção a 4bar e 8bar, efetuados com carga normal constante de 22 N, durante 60 minutos. Os ensaios sem remoção, nomeados anteriormente de ensaios referência, foram utilizados para efeito comparativo, pois foram mantidas as mesmas condições de ensaio.

A Figura 4.15 exibe os mapas triboscópicos 3D para os ensaios realizados. Observa-se para todas as condições um transiente inicial seguido de uma estabilização do coeficiente de atrito ao longo do ensaio e ainda valores de coeficiente de atrito apresentados pelos testes realizados com adição de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  parecem menores (apresentado também na Figura 4.16). Adicionalmente, nota-se para a referência e a adição de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  um leve aumento no coeficiente de atrito nas extremidades das marcas de desgaste, podendo ser em decorrência de acúmulos de debris nos pontos mortos do movimento alternado.

Sherington e Hayhurst (SHERRINGTON; HAYHURST, 2001), estudaram o efeito da densidade de debris no coeficiente de atrito, onde eles constataram que quando há uma quantidade maior de debris no contato, ou um acúmulo destes, estes contribuiriam para o aumento do coeficiente de atrito.

A Figura 4.17 retrata o coeficiente de atrito médio para o regime permanente. Análises via ANOVA usando o software Statistica evidenciaram que não há diferença entre os valores médios dos coeficientes de atrito entre os ensaios referência e com adição de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  com 95% de confiabilidade. Contudo, para os ensaios com adição de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , os valores de coeficiente de atrito apresentaram uma redução de aproximadamente 15% para estes ensaios.

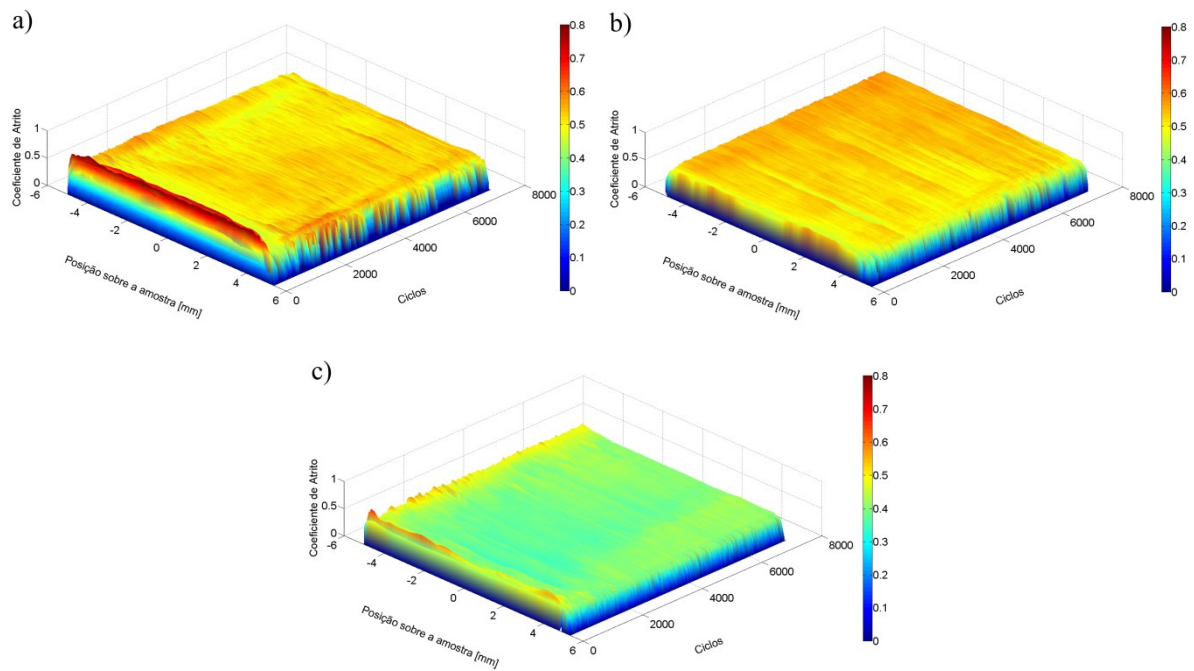


Figura 4.15: Evolução do coeficiente de atrito. (a) Referência, (b)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e (c)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

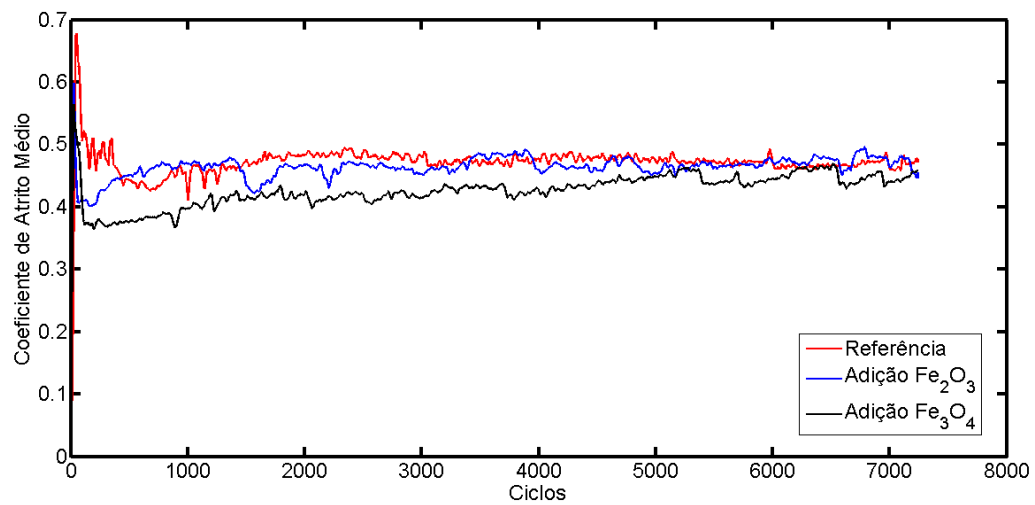


Figura 4.16: Coeficiente de atrito médio por ciclo para ensaios com adição de partículas.

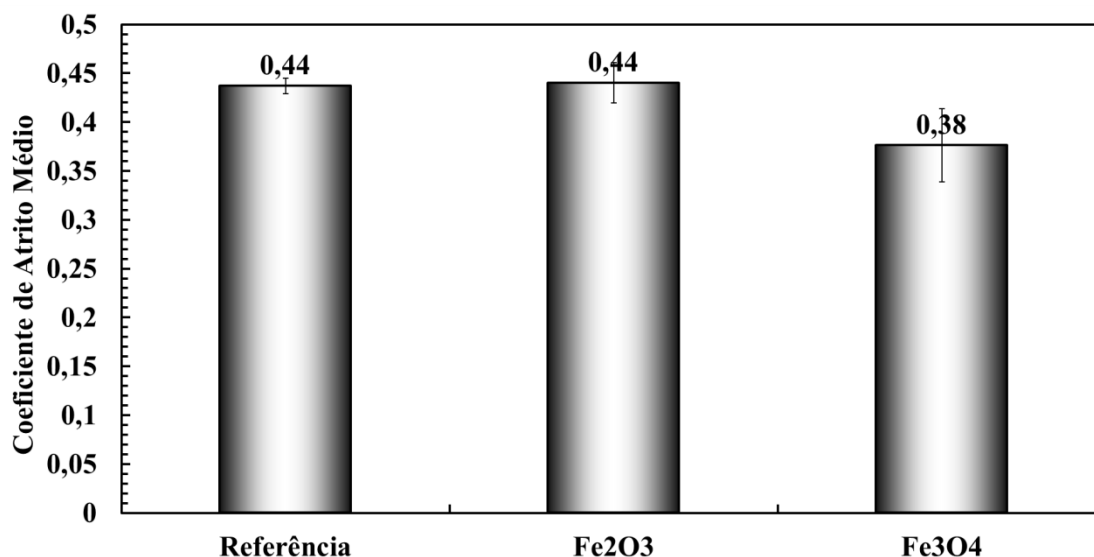


Figura 4.17: Coeficiente de atrito médio total para ensaios com adição de partículas.

A Figura 4.18 mostra os potenciais de contato típicos para os ensaios com adição de óxidos de ferro e também para a referência. Observa-se que para a referência (Figura 4.18-a) há um início com valores muito baixos do potencial de contato, indicando um possível contato metal-metal. Após cerca de 2000 ciclos, observa-se uma mudança significativa no comportamento com o aumento dos valores do potencial de contato ao longo de toda a marca de desgaste, indicando uma possível formação de camadas isolantes no contato.

Para os ensaios com adição de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 4.18-b) nota-se que o potencial de contato se mantém durante todo o ensaio em valores intermediários, indicando uma possível competição entre formação e destacamento das tribocamadas. Contudo, para os ensaios com adição de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Figura 4.18-c), o potencial de contato se mantém em valores mais altos e segue uniforme ao longo de todo o ensaio, sugerindo que há uma formação de tribocamadas já nos instantes iniciais do ensaio, podendo ser uma das razões que levaram a quedas no coeficiente de atrito (Figura 4.17) e também nas taxas de desgaste (Figura 4.19). Identifica-se ainda, um leve aumento no potencial de contato nas extremidades da marca de desgaste, podendo ser devido a acúmulos de debris nas extremidades das marcas de desgaste, como comentado também na Figura 4.15 e reportado por (OLIVEIRA JR, 2013; DOS SANTOS; COSTA; DE MELLO, 2015; OLIVEIRA JR et al., 2017).

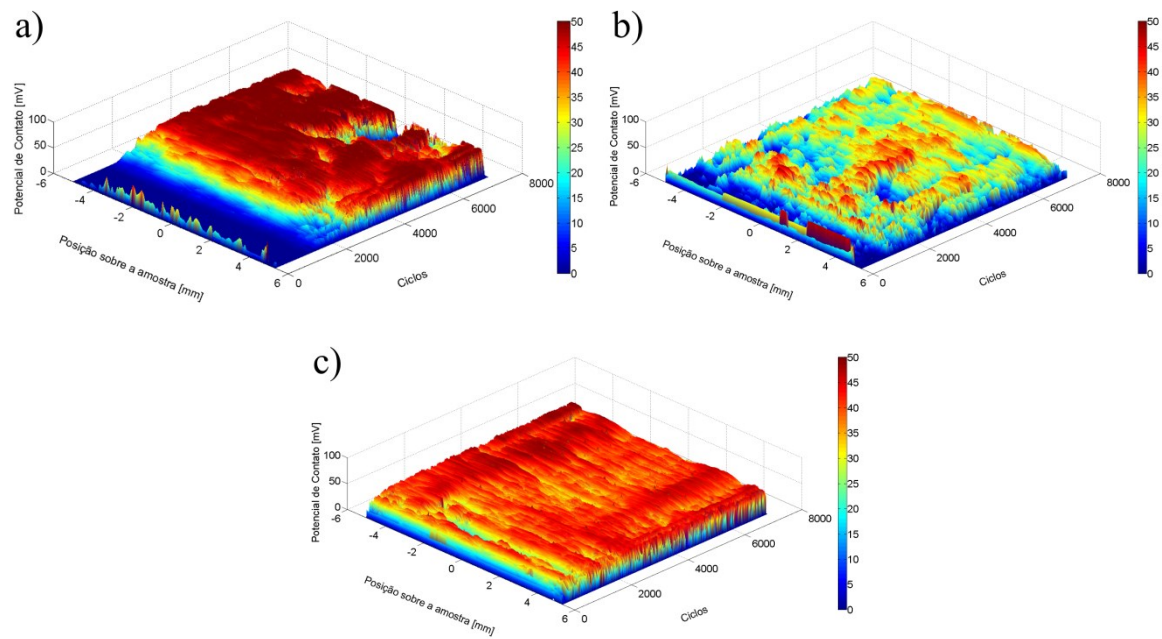


Figura 4.18: Evolução do potencial de contato. (a) Referência, (b)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e (c)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

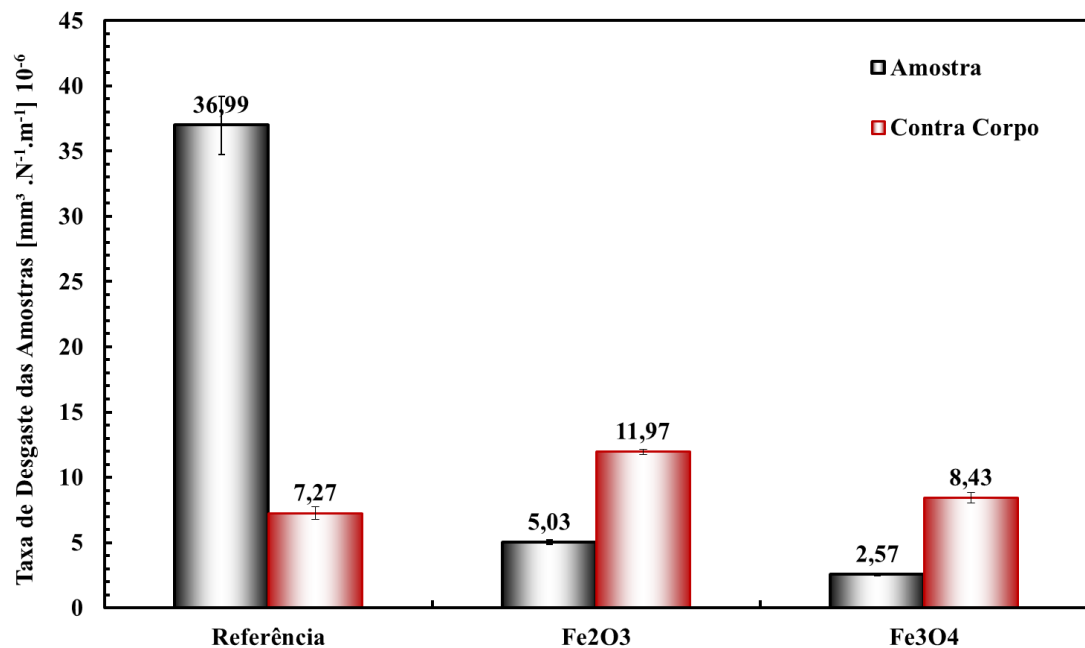


Figura 4.19: Taxa de desgaste do sistema.

Quando analisadas as trilhas de desgaste, foi possível notar uma significativa redução no desgaste das amostras em aproximadamente 85% para os ensaios com adição de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e em aproximadamente 95% para os ensaios com  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , como mostrado na Figura 4.19. Para os contra corpos, houve um aumento no desgaste para os ensaios com adição em aproximadamente 65% para os ensaios com  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e, em aproximadamente 15% para os ensaios com  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Considerando o desgaste total, ou seja, a soma dos desgastes das amostras e dos contra corpos para cada condição, a queda no desgaste para os ensaios com adição de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foi de aproximadamente 60% e para os ensaios com  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  foi de aproximadamente 75%.

Na Figura 4.20 é ilustrado um comparativo das marcas de desgaste típicas para as condições referência e com adição das partículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , analisadas via MEV. Nota-se que para os ensaios com adição, as marcas de desgaste parecem apresentar tribocamadas mais lisas e espaçadas entre si, do que para os ensaios referência (Figura 4.12). Percebe-se também que para os ensaios com adição de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , a marca de desgaste é bem mais estreita do que para as outras condições.

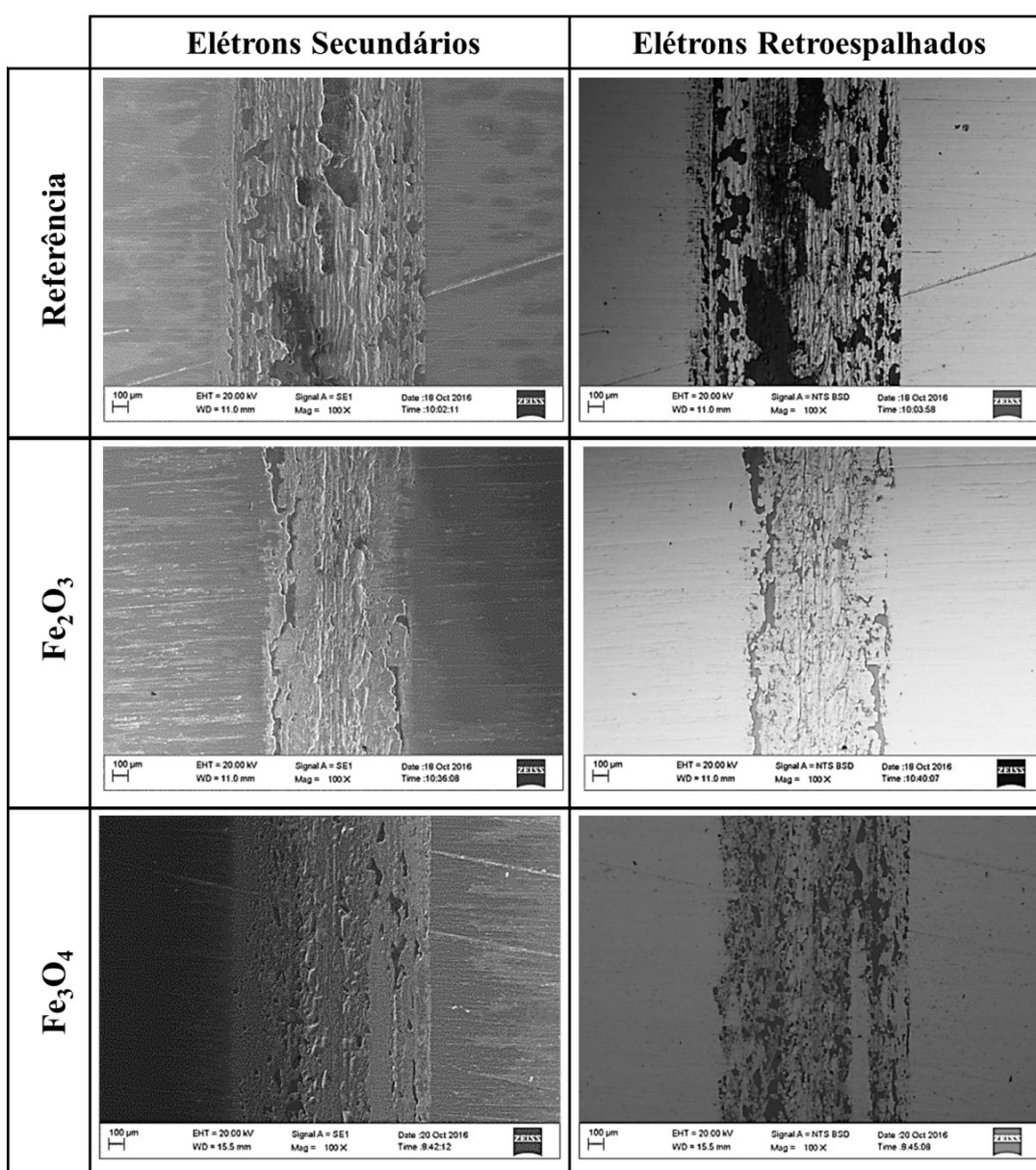


Figura 4.20: Imagens de MEV das marcas de desgaste das amostras.

A Figura 4.21 evidencia uma marca de desgaste típica para os ensaios com adição de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Na Figura 4.21-a e na Figura 4.21-b percebe-se ilhas de tribocamadas (setas brancas) com aparência lisa, diferentemente do encontrado para os ensaios referência (Figura 4.12). Análises via EDS mostram tribocamadas altamente oxidadas, com presença de ferro, manganês e cromo.

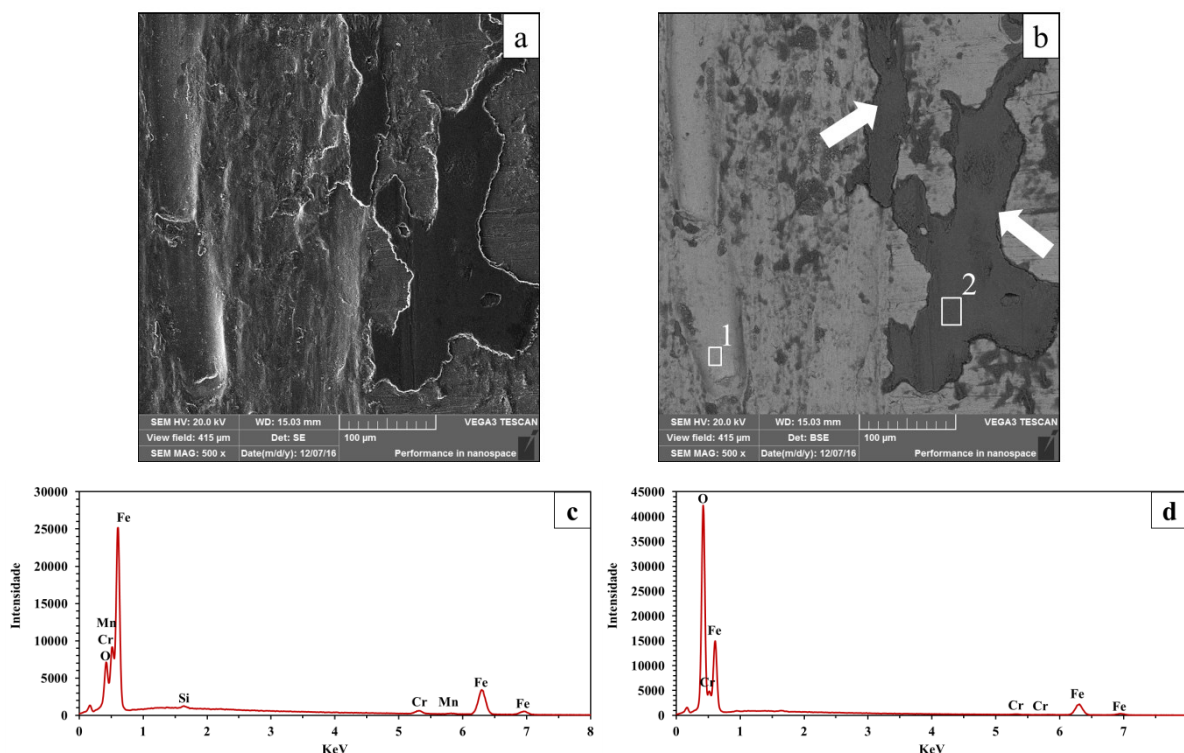


Figura 4.21: Marca de desgaste da amostra ensaiada com  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . (a) Imagem por elétrons secundários (b) Imagem por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2.

A Figura 4.22 revela um detalhe de uma marca de desgaste típica para os ensaios com adição de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Nota-se que as ilhas de tribocamadas (setas brancas) presentes nesta condição, são menores e mais bem espalhadas (mostrado anteriormente os maiores valores de potencial de contato - Figura 4.18-c) do que para os ensaios com adição de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , podendo ser esta uma explicação para a leve redução no coeficiente de atrito. Percebe-se ainda marcas de abrasão (seta vermelha), provavelmente oriundas de possíveis debris oxidados e duros que promoveram tal desgaste. Análises via EDS evidenciaram elementos similares aos presentes nos ensaios com adição de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sendo muito oxidadas e com presenças de ferro, manganês e cromo.

Um compilado dos valores da resistividade elétrica de vários materiais foi feito por (BOZZI, 2004). Segundo o autor, os valores da resistividade elétrica dos óxidos de ferro



apresentam diferenças de várias ordens de grandeza, com valores médios de cerca de  $10^7 \Omega.m$  para  $Fe_2O_3$  e  $10^{-4} \Omega.m$  para  $Fe_3O_4$ . Isto significa que toda resistência elétrica apresentada por uma camada superficial de óxidos composta de  $Fe_2O_3$  e  $Fe_3O_4$  se origina da camada de  $Fe_2O_3$  (SENKEVICH; JONES; CHATTERJEE, 2000).

Em outro trabalho, foi avaliada a formação de óxidos em contatos tribológicos em um par aço-aço, onde foi detectada através de análises via raios-X, uma maior formação de  $Fe_2O_3$  (cerca de 95%) e aproximadamente 1% de  $Fe_3O_4$  (STRAFFELINI; TRABUCCO; MOLINARI, 2001). Esta maior formação de debris de  $Fe_2O_3$  pode ser a razão dos potenciais de contato apresentarem altos valores, mesmo nos ensaios com adição de  $Fe_3O_4$ .

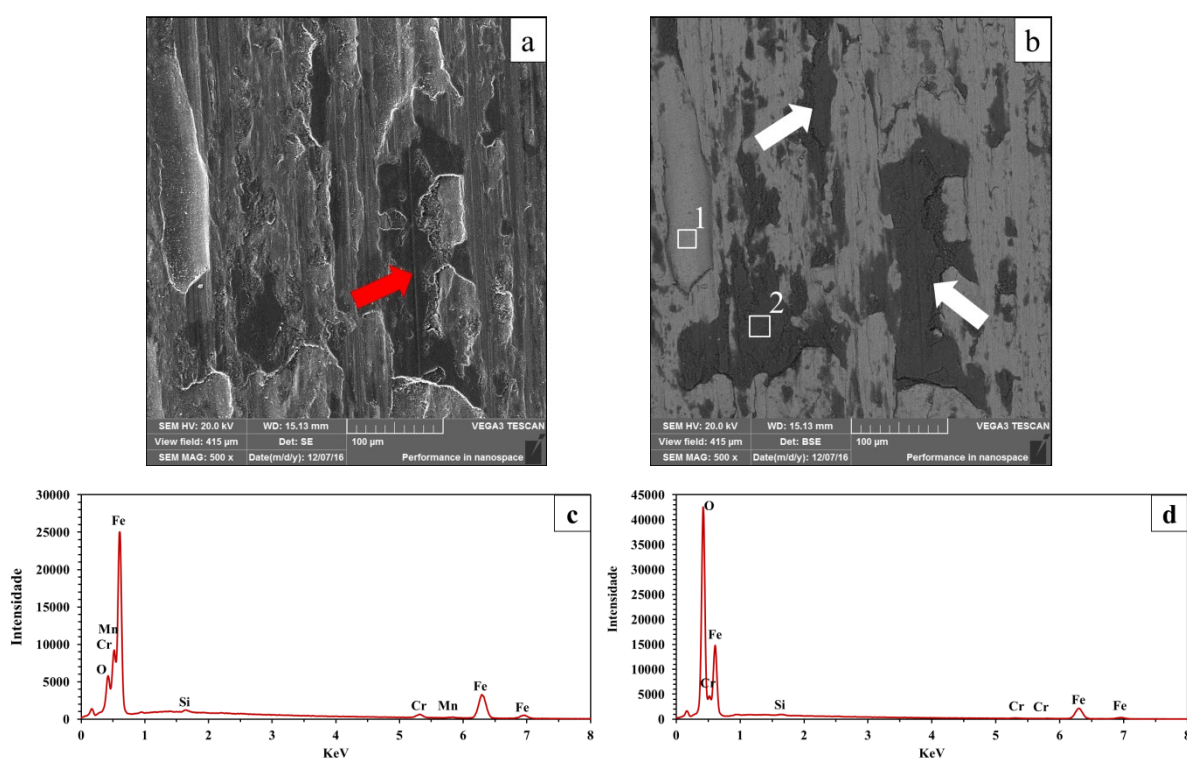


Figura 4.22: Marca de desgaste típica para amostra ensaiada com  $Fe_3O_4$ . (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2.

Como comentado anteriormente, as partículas adicionadas possuem diferenças quanto ao tipo, tamanho e dureza. O menor desgaste foi apresentado para os ensaios com adição de  $Fe_3O_4$ , de menor dureza e tamanho maior. A Tabela 4.2 mostra uma síntese dos valores de dureza dos corpos em contato.

Tabela 4.2 Valores de dureza para as partículas adicionadas e corpos em contato.

<b>Amostra</b>	<b>Dureza Vickers (Kgf.mm<sup>-2</sup>)</b>
<b>Aço ferramenta</b>	611 ±30
<b>Esfera de aço</b>	772 ±5
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1308
<b>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	370-600

A dureza relativa da partícula abrasiva em relação ao material ( $H_A/H_M$ ) tem influência considerável sobre a taxa de desgaste do sistema. Geralmente, para materiais heterogêneos, quando a dureza relativa das partículas em relação aos materiais em contato é menor que 0,9, há uma tendência de ocorrer um menor desgaste abrasivo, estando em um regime de desgaste suave, com deformação elástica e plástica das superfícies em contato, podendo resultar em desgaste por fadiga superficial e/ou adesão. Porém, quando a dureza relativa é maior que 1,5, o mecanismo desgaste tende a sofrer uma transição para o regime severo, levando a um aumento no desgaste. Entre esses dois valores, há um regime de transição entre os regimes de desgaste suave e severo (ZUM GAHR, 1987; HUTCHINGS, 1992). A influência da dureza relativa na transição do desgaste foi mostrada também por (BOZZI; DE MELLO, 1999; KATO; ADACHI, 2001).

Nos ensaios com as partículas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a dureza relativa das partículas adicionadas ( $H_A/H_M$ ) apresenta valores próximos a 2, onde a tendência é de ocorrer um desgaste maior do que para os ensaios com adição das partículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, pois a dureza relativa para estes ensaios é menor, oscilando entre 0,5 e 1. Esta diferença na dureza relativa das partículas adicionadas, levaria a diferentes regimes de desgaste, podendo então explicar as diferenças nas taxas de desgaste encontradas para os ensaios com adição de partículas de óxido de ferro.

A Figura 4.23 exibe as marcas de desgaste típicas para os contra corpos. Notam-se marcas de abrasão mostradas pelas setas brancas para a referência e para os ensaios com adição de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, sendo mais pronunciados para os ensaios com adição, provavelmente devido às partículas adicionadas ao contato. É possível ainda observar que as tribocamadas apresentaram uma tendência de formação nas bordas das marcas de desgaste do contra corpo (setas azuis), indicando um possível acúmulo de debris na entrada/saída do contato, que devido à alternância do movimento, a entrada e a saída se invertem, e devido à cuba estar completamente cheia de partículas (sem transbordamento), estas se acumulariam nas duas entradas (nos dois sentidos do movimento), formando essas tribocamadas. Outro fator importante seria o efeito da concentração de tensão nas bordas dos contatos plano-plano onde



haveria uma maior disponibilidade de energia para a formação destas tribocamadas preferencialmente nas bordas da marca de desgaste dos contra corpos. Este mecanismo de transferência de material também foi observado por (MILAN et al., 2005).

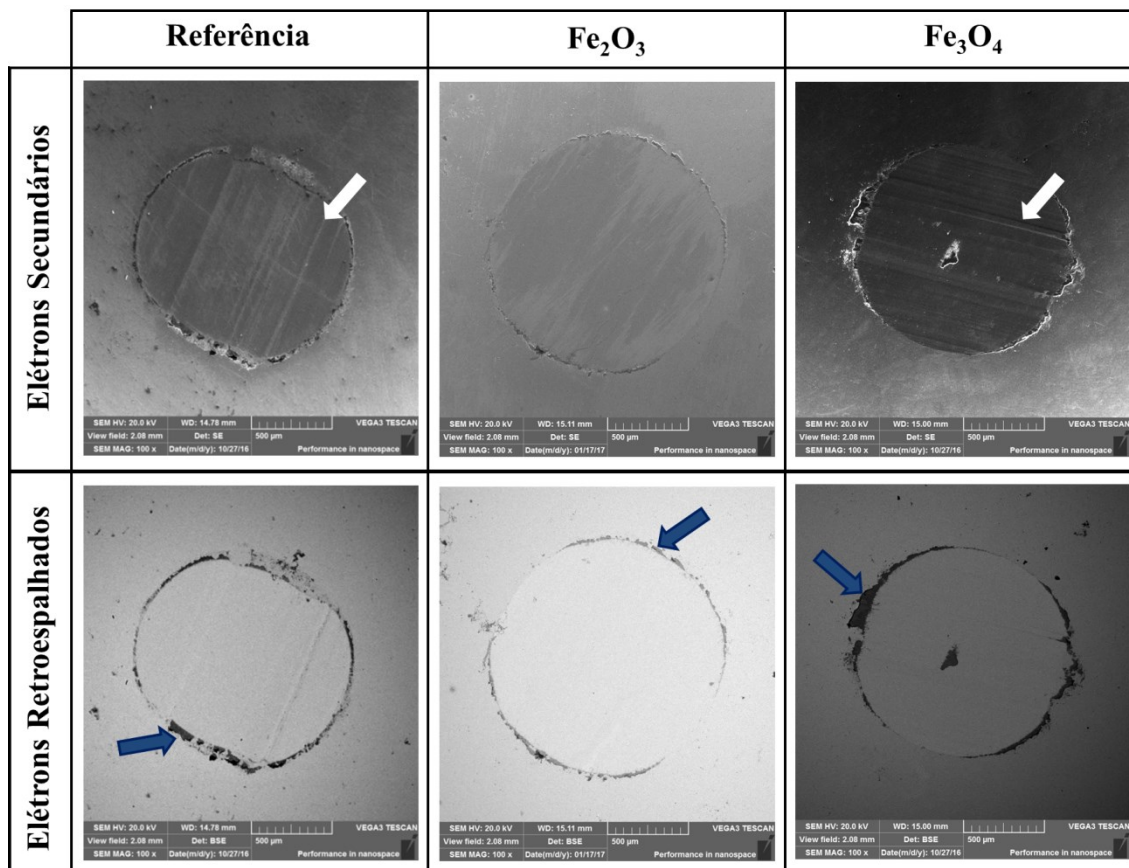


Figura 4.23: Imagens de MEV das marcas de desgaste dos contra corpos.

A Figura 4.24 revela um detalhe da marca de desgaste de um contra corpo dos ensaios referência. Como comentado anteriormente, em todas as condições houve um acúmulo de materiais nas bordas da marca de desgaste. As análises via EDS mostraram que na região da tribocamada, a mesma está altamente oxidada com presenças de ferro e cromo, este último provavelmente oriundo das amostras, indicando uma transferência de material. No interior da marca de desgaste, foi detectada a presença de ferro e traços de cromo (elementos presentes na composição química do contra corpo).

A Figura 4.25 retrata as marcas de desgaste para os ensaios com adição de óxidos de ferro. Como pôde ser notado também na Figura 4.23, todas as marcas de desgaste produzidas nos contra corpos revelaram uma tendência em um acúmulo de tribocamadas nas bordas das marcas de desgaste (representado pelas setas azuis), como comentado anteriormente. As análises via EDS evidenciaram tribocamadas com características similares às encontradas

para os ensaios referência, se apresentando muito oxidadas com presenças de ferro e cromo, provavelmente oriundos das amostras. No interior da marca de desgaste, foram detectados basicamente elementos presentes no material do contra corpo.

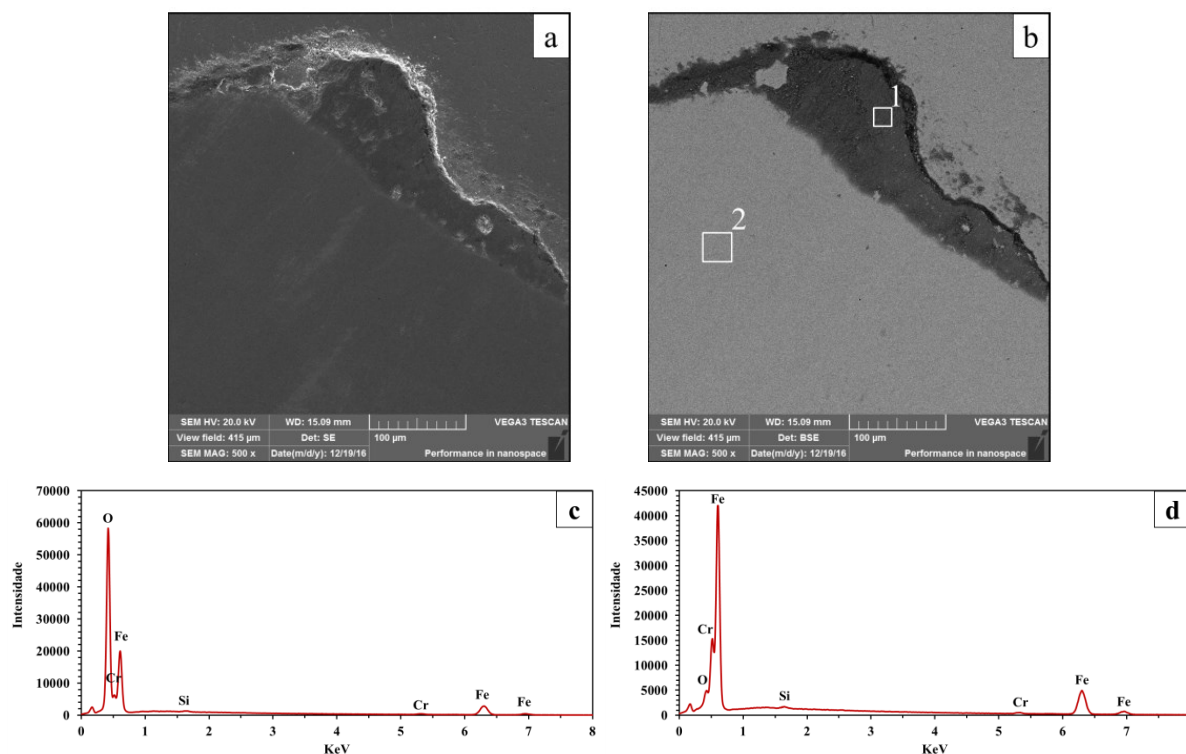


Figura 4.24: Detalhe da marca de desgaste do contra corpo do ensaio referência. (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Espectro EDS para a área 1, (d) Espectro EDS para a área 2.

Segundo Hutchings (HUTCHINGS, 1992), o desgaste suave é caracterizado quando os debris são muito finos (tipicamente em tamanhos entre  $0,01\ \mu\text{m}$  até  $1\ \mu\text{m}$ ), onde são predominantemente óxidos e a marca de desgaste é relativamente lisa. Já o desgaste severo resulta em debris muito maiores e essencialmente metálicos, variando numa faixa de tamanhos de  $20\ \mu\text{m}$  a  $200\ \mu\text{m}$ , gerando uma marca de desgaste mais rugosa. Ainda segundo Hutchings a maior diferença entre os dois regimes está na natureza dos debris e na variação das taxas de desgaste, que podem ser entre 100 ou até 1000 vezes maior para o desgaste severo.

Em regimes de desgaste suave, debris oxidados de tamanhos pequenos ( $<0,5\ \mu\text{m}$ ) também foram relatados por (KATO; EYRE; RALPH, 1994). Outros autores ainda relataram que as tribocamadas compactas são formadas por estas partículas de tamanhos menores, variando entre  $0,01\ \mu\text{m}$  e  $0,05\ \mu\text{m}$  (STOTT; WOOD, 1978). Embora, em contraste, a literatura ainda mostra que partículas de óxidos na faixa de  $0,3$  a  $45\ \mu\text{m}$ , quando adicionadas

ao contato, reduzem o desgaste severo, sendo mais efetivas as partículas de óxidos adicionadas com diâmetros próximos a  $1\ \mu\text{m}$  (IWABUCHI; HORI; KUBOSAWA, 1988). Como mostrado anteriormente, nos ensaios efetuados com aços, os óxidos adicionados promoveram uma queda no coeficiente de atrito e desgaste, e os que promoveram uma maior queda foram os maiores, embora a variação na dureza relativa dos mesmos em relação às superfícies em contato é que poderia ser a principal causa desta queda.

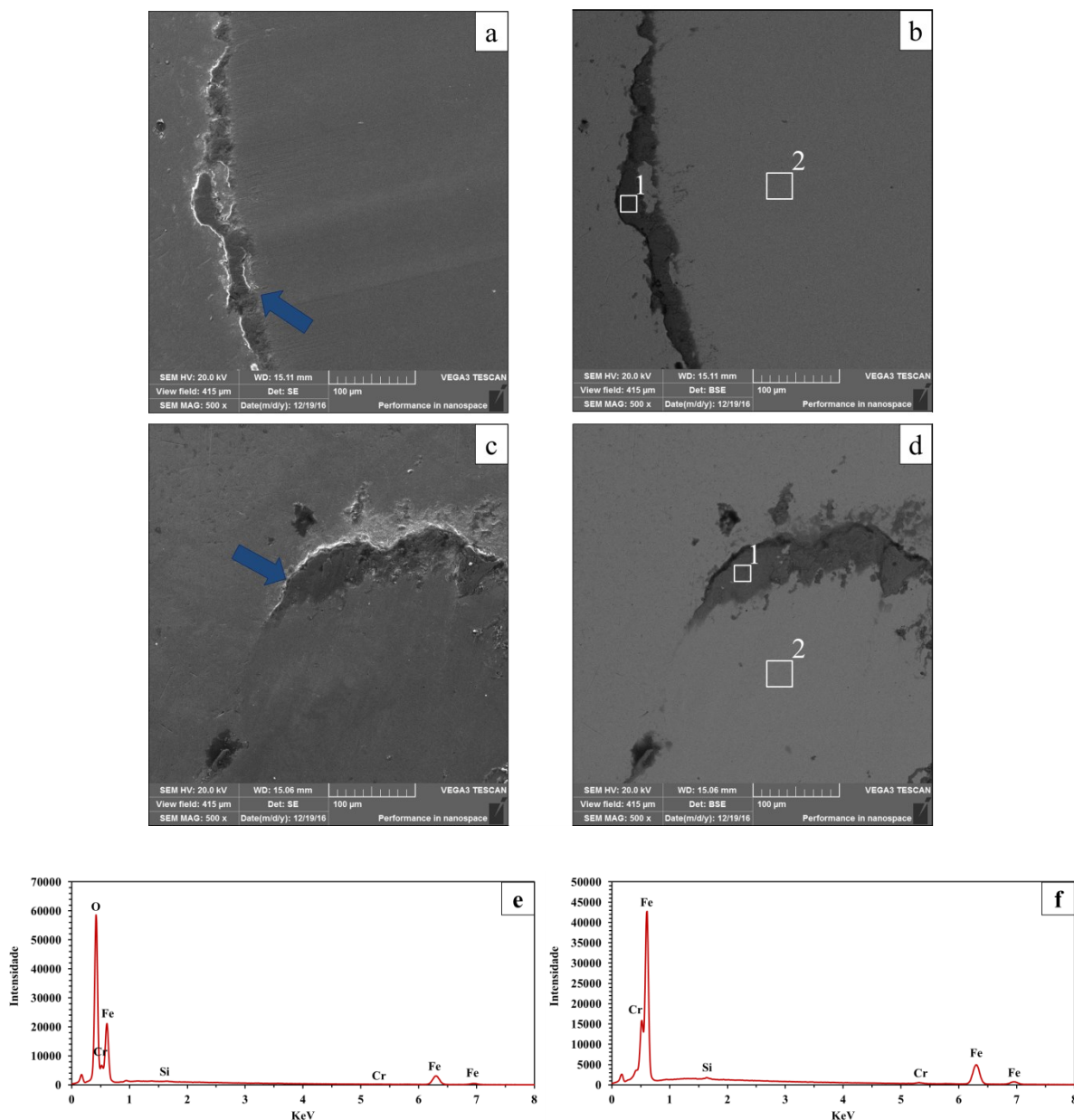


Figura 4.25: Análise via MEV-EDS para os contra corpos ensaiados com Adição. (a) e (b) Imagens por elétrons secundários e retroespalhados para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  respectivamente (c) e (d) Imagens por elétrons secundários e retroespalhados para  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  respectivamente (e) Espectro EDS típico para as áreas “1”, (f) Espectro EDS típico para as áreas “2”.

Portanto a adição de partículas de óxidos de ferro promoveu uma diminuição no coeficiente de atrito em 15% e também uma redução no desgaste em 95% quando adicionadas as partículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (menos duras e maiores), sugerindo que existe então uma influência da presença de debris no comportamento tribológico, e ainda que o tamanho e a dureza deles também alteram o comportamento, onde principalmente a dureza relativa entre partícula adicionada e superfícies em contato é, provavelmente, o fator determinante na redução do desgaste. Como comentado anteriormente, as partículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  promoveram uma queda maior no atrito e desgaste quando comparadas com as partículas mais duras e menores ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

#### **4.2 - Efeito da remoção de debris e adição de partículas de alumina em ensaios com alumínio.**

Com a intenção de se estudar o efeito do tamanho dos debris no comportamento tribológico, optou-se por um material que possibilitasse uma grande variação de tamanhos dos debris, e que estes fossem facilmente encontrados e também com um custo menor. É razoável supor que os debris formados em ensaios com alumínio são na verdade óxidos de alumínio, ou seja, alumina. Assim, optou-se por usar alumínio comercialmente puro como material de estudo, juntamente com a adição de partículas de alumina para atuarem em conjunto com os debris formados no contato, devido à maior disponibilidade e facilidade em se variar os tamanhos das partículas de alumina. A Tabela 4.3 apresenta a composição química das amostras de alumínio comercialmente puro, utilizadas nos ensaios.

Tabela 4.3: Composição química das amostras de alumínio (porcentagem em peso).

<b>Elemento</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Si</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>
<b>% peso</b>	0,0015	0,0032	98,6	0,032	0,018	0,202	0,77	0,009	0,355

Os testes de deslizamento alternados foram feitos em amostras de alumínio comercialmente puro polidas via polimento eletrolítico. A Figura 4.26 mostra a topografia de superfície analisada via interferometria a laser para as amostras de alumínio comercialmente puro, polidas por polimento eletrolítico.

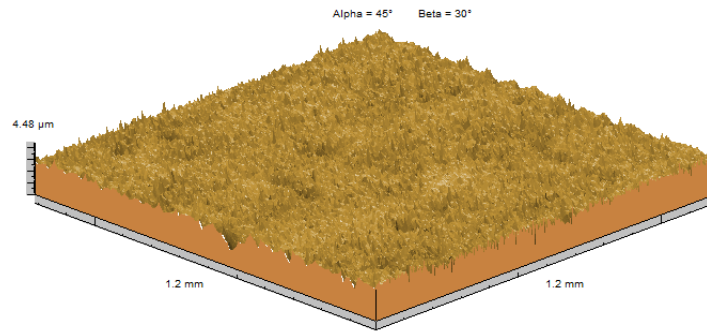


Figura 4.26: Mapa topográfico típico das amostras de Alumínio.

A Figura 4.27 retrata os parâmetros topográficos das amostras de alumínio. Apesar do processo de polimento eletrolítico efetuado nas amostras de alumínio, nota-se que os contra corpos (parâmetros mostrados na Figura 4.5) ainda são substancialmente mais lisos que as amostras de alumínio.

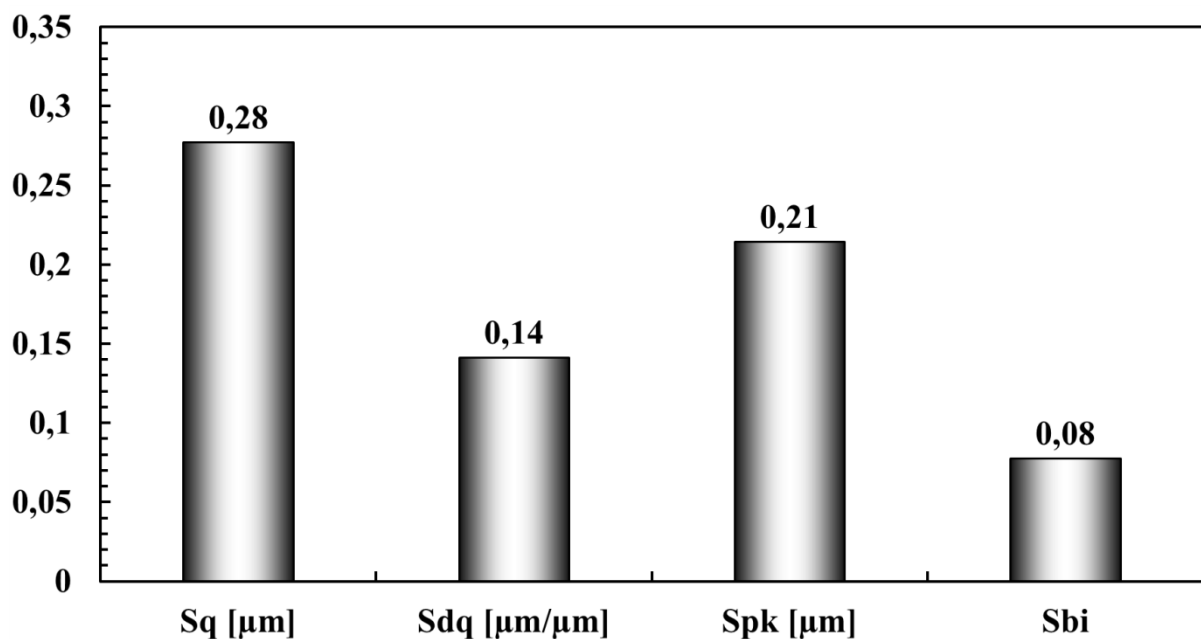


Figura 4.27: Parâmetros topográficos das amostras de Alumínio polidas.

Na tentativa de simular uma condição onde a variação do tamanho dos debris pudesse influenciar no regime de desgaste, foram adicionadas ao contato, partículas de 0,05 μm (dentro do regime suave) e 10 μm (no regime severo), em excesso, como feito anteriormente para ensaios com adição de óxidos de ferro em aços ferramenta. Adicionalmente foram feitos ensaios a seco com remoção de debris e também, sem remoção, sendo estes últimos, usados como referência, denominados de “RS”. Os ensaios foram efetuados com carga normal de 7 N e com duração de 30 minutos.

A Figura 4.28 apresenta a evolução do coeficiente de atrito em função da posição sobre a amostra e do número de ciclos para estes ensaios. Os mapas 3D revelam que, aparentemente, as condições RS (Figura 4.28-a), 0,05  $\mu\text{m}$  (Figura 4.28-b) e 10  $\mu\text{m}$  (Figura 4.28-c) apresentam um comportamento semelhante, com aumento no coeficiente de atrito em uma das bordas. Já para os ensaios com remoção de debris (Figura 4.28-d), o coeficiente de atrito aparece mais alto no início do ensaio e tende a cair no decorrer do mesmo, como mostrado também na Figura 4.29 (curva em verde).

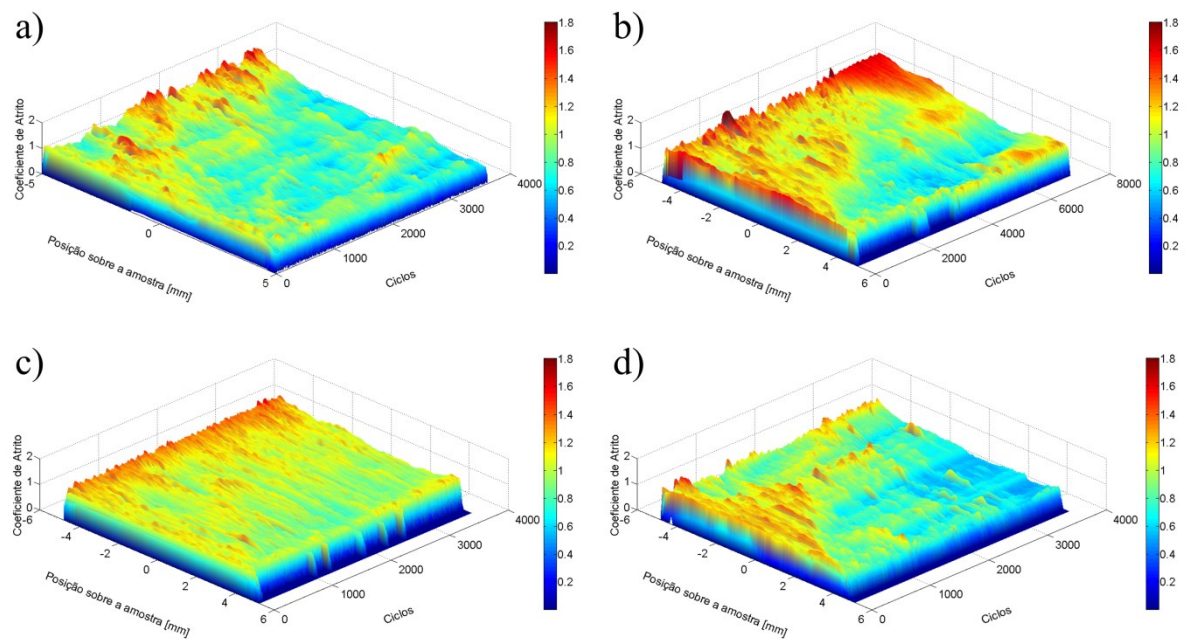


Figura 4.28: Evolução do coeficiente de atrito. (a) RS, (b) 0,05  $\mu\text{m}$ , (c) 10  $\mu\text{m}$ , (d) Remoção.

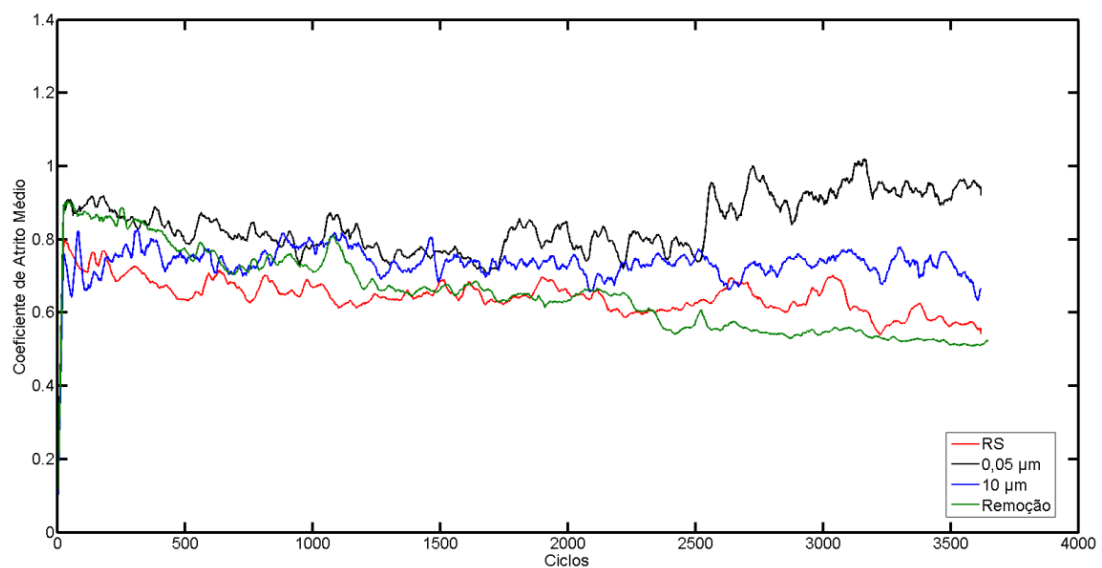


Figura 4.29: Coeficiente de atrito médio por ciclo.



Ainda na Figura 4.29 percebe-se que o coeficiente de atrito aparece maior para os ensaios com adição de alumina, com diâmetro de  $0,05\ \mu\text{m}$  ao longo de todo o ensaio. Para os ensaios com remoção de debris o coeficiente de atrito aparece alto no início do ensaio, e cai ao longo do mesmo até atingir o menor valor entre as condições testadas. Os ensaios com adição de alumina com  $10\ \mu\text{m}$  mantiveram valores de coeficiente de atrito intermediários e mais uniformes durante todo o ensaio. Já os ensaios RS (sem remoção/adição) evidenciaram valores de coeficiente de atrito mais baixos e mais próximos aos ensaios com remoção.

A Figura 4.30 destaca o coeficiente de atrito médio do regime permanente. As condições com adição de partículas ( $0,05\ \mu\text{m}$  e  $10\ \mu\text{m}$ ) foram as que revelaram os maiores coeficientes de atrito. Já as condições RS e Remoção apresentaram um coeficiente de atrito mais baixo e com valores equivalentes. Este aumento no coeficiente de atrito apresentado pelas condições com adição de alumina está provavelmente associado à maior energia na movimentação das partículas adicionadas ao contato, que será mais bem discutido subsequentemente quando mostradas as análises das marcas de desgaste via MEV-EDS.

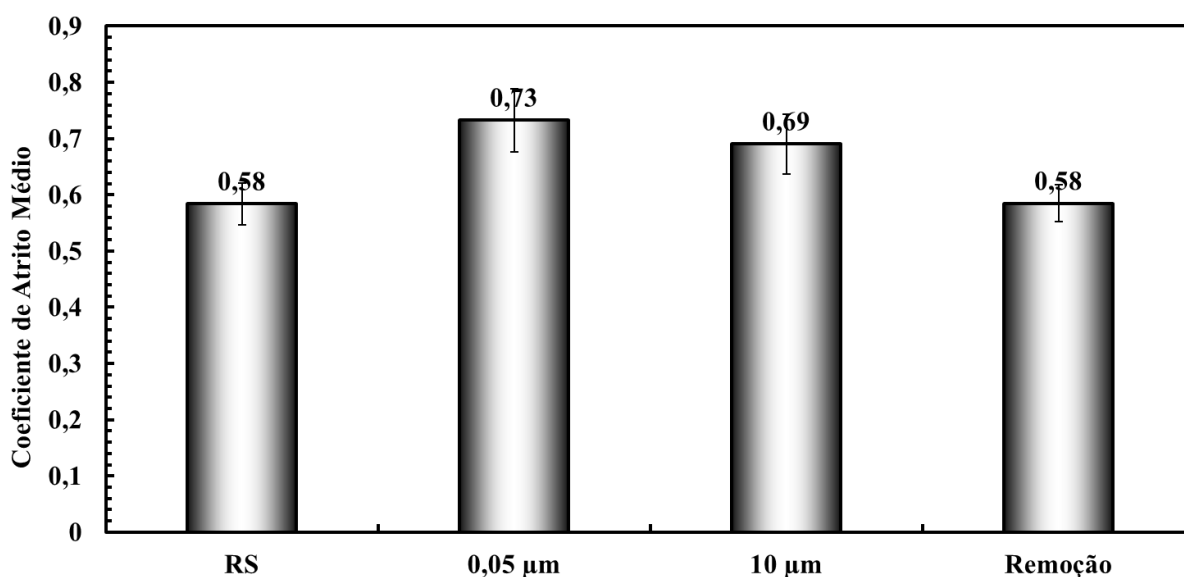


Figura 4.30: Coeficiente de atrito médio no regime permanente.

A Figura 4.31 retrata a taxa de desgaste para o sistema. Os ensaios com adição de partículas com  $0,05\ \mu\text{m}$  foram os que apresentaram a maior taxa de desgaste para as amostras (cerca de 40% maior). As demais condições revelaram valores de taxa de desgaste próximos, ou seja, tanto a adição de partículas maiores ( $10\ \mu\text{m}$ ) quanto a remoção dos debris não mostrou influência significativa na taxa de desgaste das amostras.

Para os contra corpos, a taxa de desgaste se mostrou uma ordem de grandeza menor que para as amostras. As condições RS e Remoção apresentaram taxas de desgaste semelhantes

para os contra corpos, assim como para as amostras. Já as condições com adição revelaram valores diferentes, sendo que a adição dos menores debris promoveu um aumento em torno de 25%, e a adição dos maiores debris se mostrou com valores próximos às condições RS e com remoção.

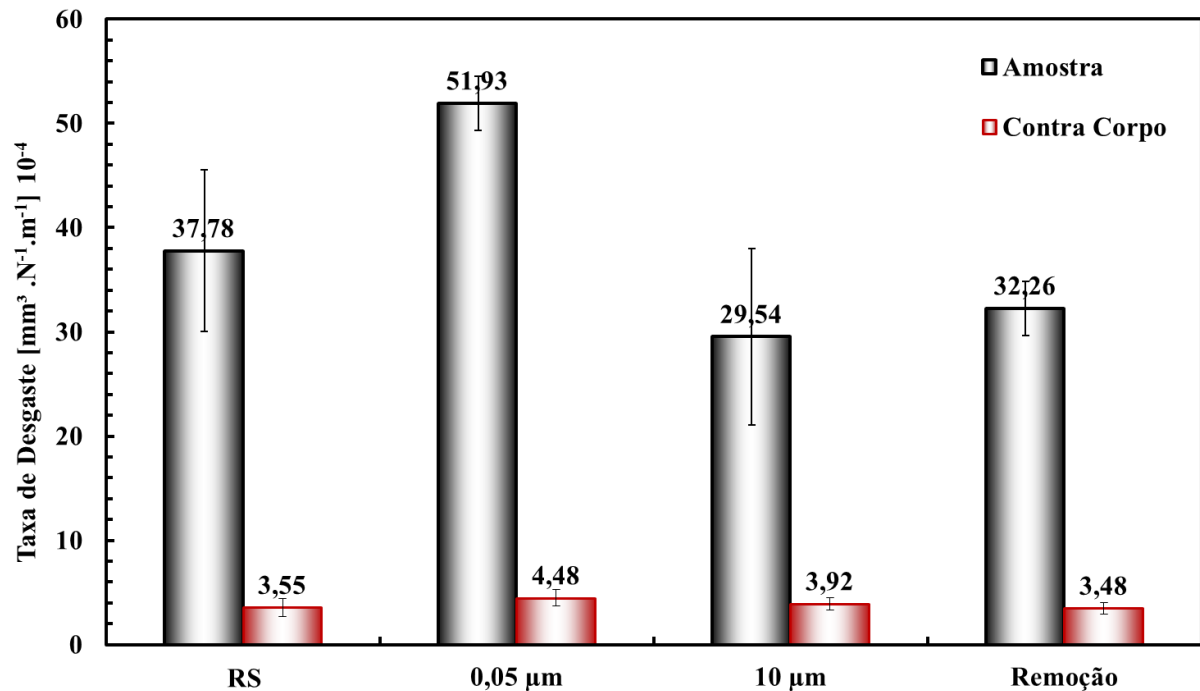


Figura 4.31: Taxa de desgaste do sistema.

A Figura 4.32 exibe um comparativo das marcas de desgaste típicas para as condições testadas. Observando as imagens via elétrons secundários para as condições RS e Remoção, nota-se uma predominância de deformações plásticas identificadas pelas setas vermelhas e mais claramente percebidas no detalhe mostrado na Figura 4.33-a. Quando observadas as trilhas de desgaste por elétrons retroespalhados, percebe-se para as condições com 0,05  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ , que há regiões com colorações cinza escuro e também algumas pequenas regiões esbranquiçadas, ambas mostradas pelas setas azuis, indicando a formação de tribocamadas, sendo estas mais presentes para 10  $\mu\text{m}$ .



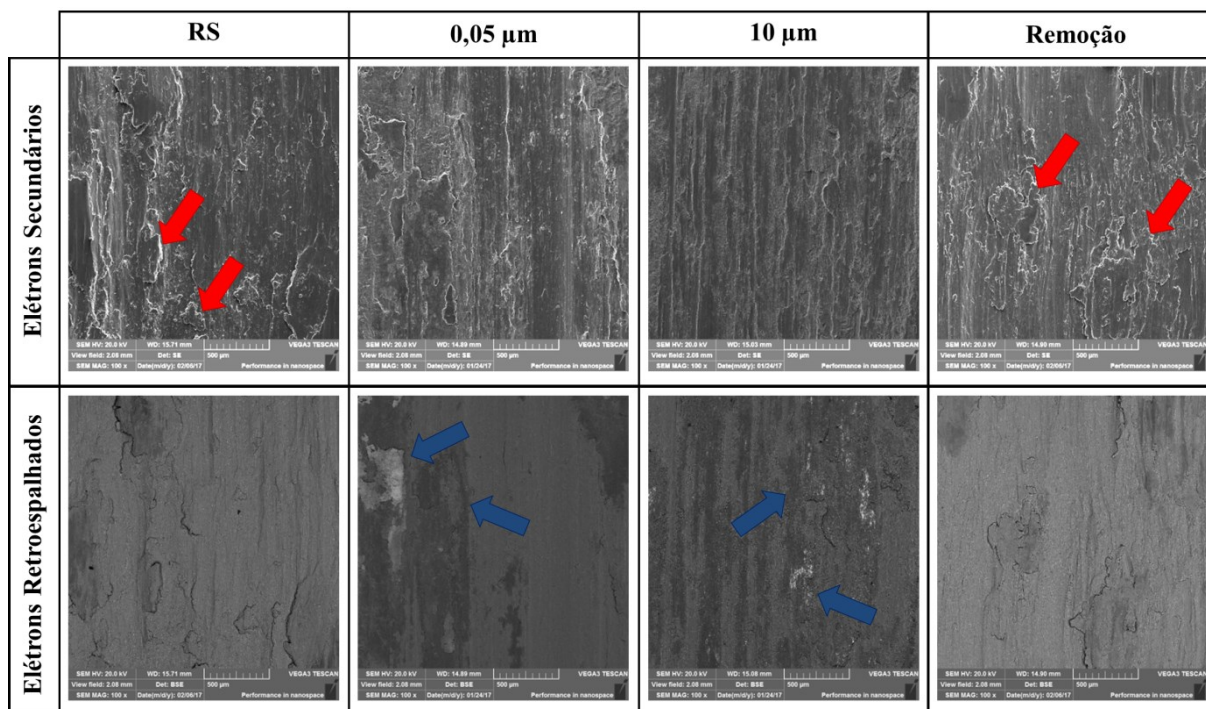


Figura 4.32: Imagens de MEV das marcas de desgaste das amostras.

A Figura 4.33 retrata uma análise por MEV para uma marca de desgaste típica para as condições RS e com remoção. Nota-se na Figura 4.33-a e na Figura 4.33-b que há regiões com deformação plástica (setas vermelhas) e com pouca ou nenhuma formação de tribocamadas, como mostrado também na análise via EDS (Figura 4.33-c e Figura 4.33-d), onde os espectros são similares com a presença de Alumínio (material das amostras) e traços de Oxigênio, Silício e Manganês.

A Figura 4.34 mostra uma análise por MEV para uma marca de desgaste típica para os ensaios com adição de partículas com diâmetro de 0,05  $\mu\text{m}$ . Na Figura 4.34-b (imagem de MEV por elétrons retroespalhados) nota-se regiões mais claras (setas brancas), indicando a presença de materiais com número atômico maior, sugerindo a formação de camadas aderidas à superfície desgastada. Análises via EDS na região mais clara (Figura 4.34-c) mostra uma camada oxidada, com a presença de alumínio e ferro e com traços de cromo, sendo os últimos provavelmente oriundos do contra corpo, sugerindo que houve transferência de material entre os corpos envolvidos, formando uma camada composta por elementos dos dois corpos. Para a região mais escura, as análises detectaram os elementos alumínio e oxigênio.

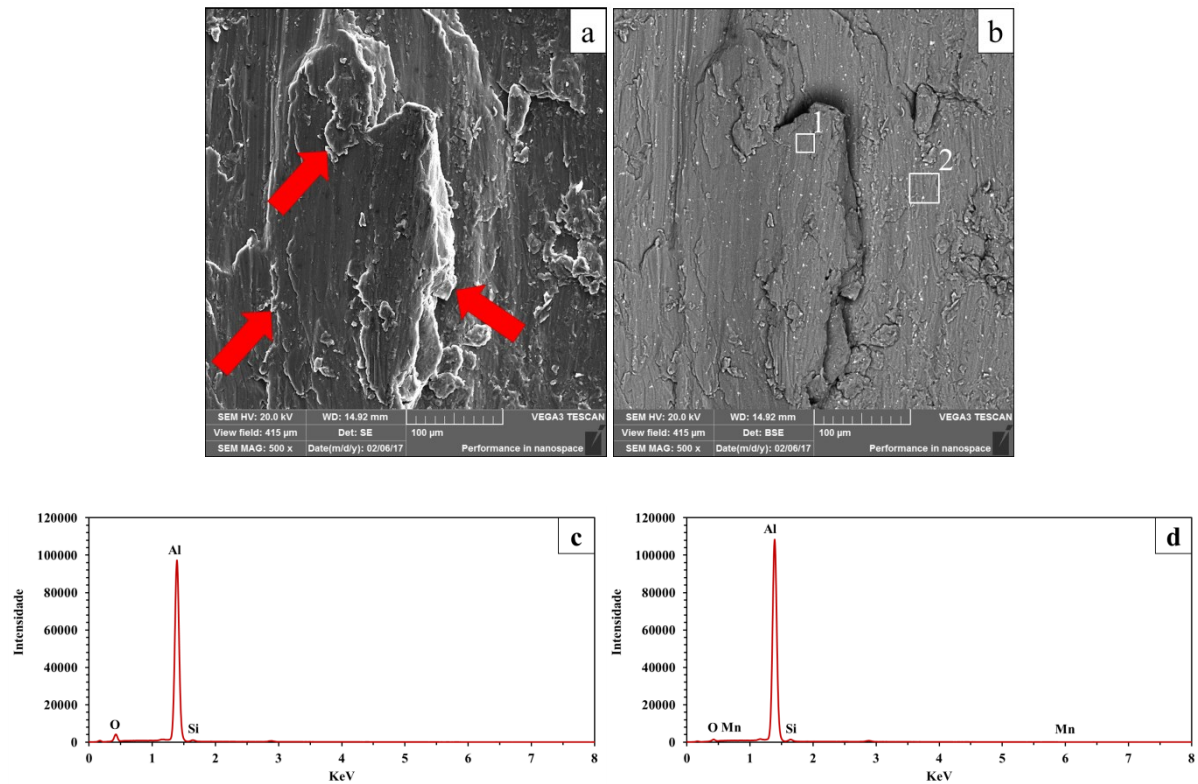


Figura 4.33: Análise das marcas de desgaste via MEV-EDS – Típico para RS e Remoção. (a) e (b) Imagens de MEV por elétrons secundários e retroespalhados respectivamente. (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2.

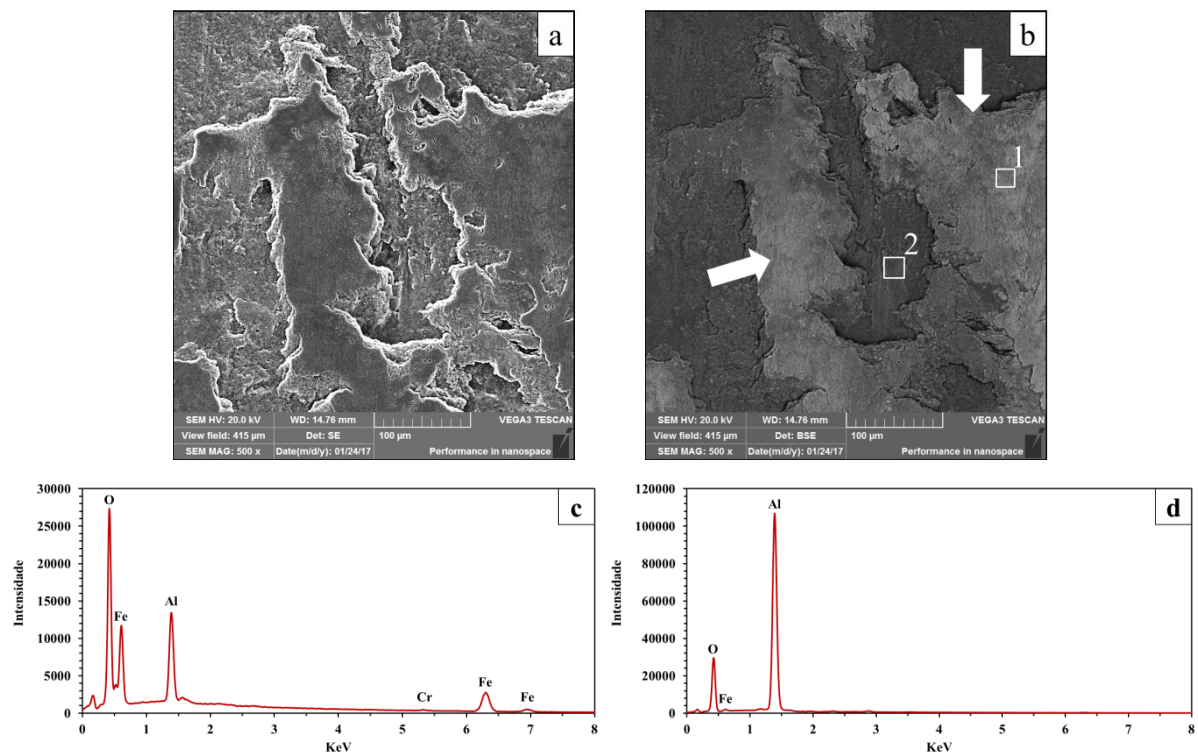


Figura 4.34: Análise das tribocamadas para ensaios com adição de debris com  $0,05\ \mu\text{m}$ . (a) e (b) Imagens de MEV por elétrons secundários e retroespalhados respectivamente. (c) e (d) Espectros EDS para as áreas 1 e 2 respectivamente.

A Figura 4.35 apresenta as análises por MEV e EDS para os ensaios com 10  $\mu\text{m}$ . Diferentemente das marcas de desgaste para os ensaios com 0,05  $\mu\text{m}$  (Figura 4.34), as tribocamadas formadas para esta condição se formaram mais espalhadas como mostrado pela Figura 4.35-a e pela Figura 4.35-b. Análises via EDS evidenciaram a presença de alumínio com traços de Ferro e com picos menores de oxigênio para as regiões mais escuras (Figura 4.35-c e Figura 4.35-d). Já para a pequena região mais clara, ponto 3 da Figura 4.35-b, o espectro EDS (Figura 4.35-e) mostrou uma maior quantidade de oxigênio e ferro, indicando novamente transferências de material entre corpo e contra corpo, mas com menor intensidade que para os ensaios com 0,05  $\mu\text{m}$ .

Apesar da formação de tribocamadas, as taxas de desgaste apresentadas pelas condições com adição foram iguais ou maiores que as condições RS e Remoção, indicando um efeito negativo da presença desta maior quantidade de debris no contato.

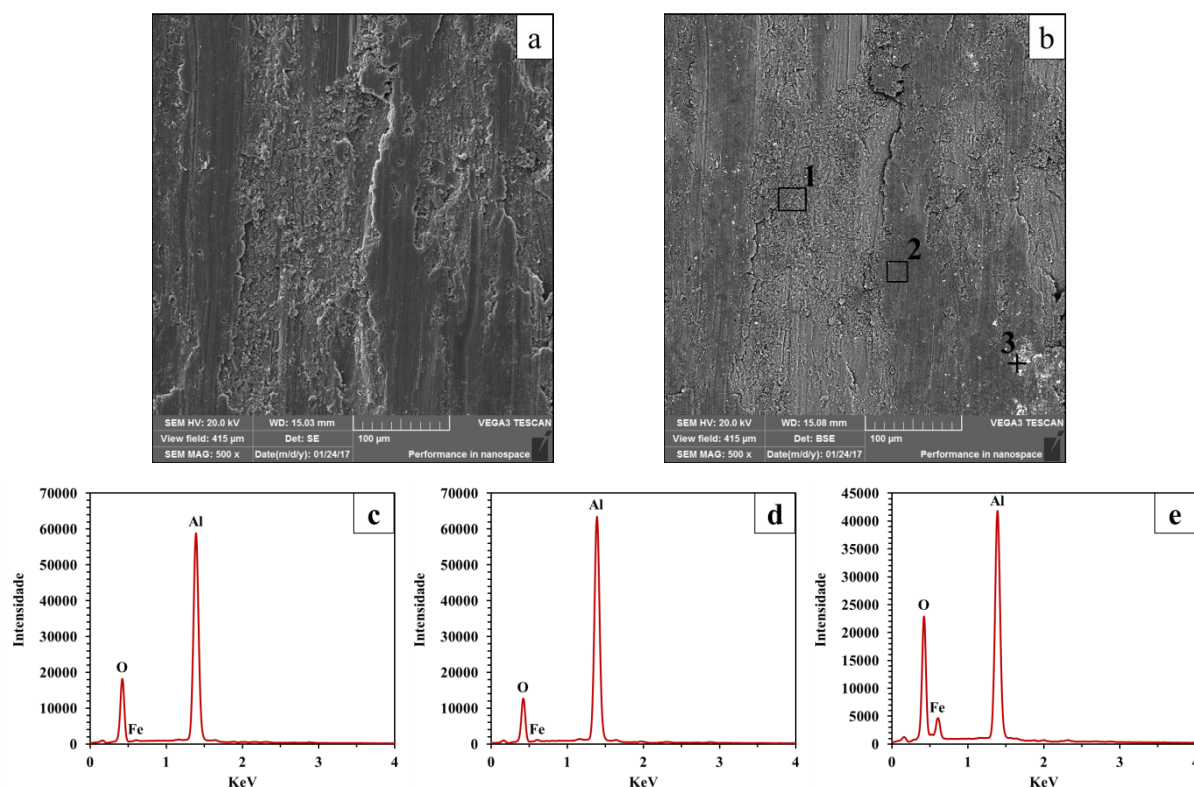


Figura 4.35: Análise de uma marca de desgaste para os ensaios com adição de partículas de 10 $\mu\text{m}$ . (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2, (e) Análise EDS para o ponto 3.

A Figura 4.36 mostra um comparativo para os contra corpos ensaiados. Percebe-se que para as condições RS e Remoção, predominam maiores formações de tribocamadas em toda a marca de desgaste (setas azuis), enquanto que para as condições com adição, a formação de



tribocamadas é menor no interior da marca e também nas bordas das marcas de desgaste. Isto pode ser atribuído a um mecanismo diferente de desgaste dos contra corpos, onde nos ensaios com adição de partículas estas parecem contribuir para uma maior formação das tribocamadas nas superfícies das amostras, enquanto que nos ensaios sem adição, esta formação de tribocamada se dá na superfície dos contra corpos. Como os ensaios com adição de partículas apresentaram maiores coeficientes de atrito, isto poderia ocasionar no contato uma maior geração de calor e ainda aliado ao efeito da concentração de tensão nas bordas dos contatos plano-plano (esfera desgastada em contato com a amostra), nestas regiões haveria uma maior disponibilidade de energia para a formação destas tribocamadas, estando preferencialmente nas bordas da marca de desgaste dos contra corpos, como visto anteriormente nos ensaios com adição de partículas de óxido de ferro (Figura 4.23).

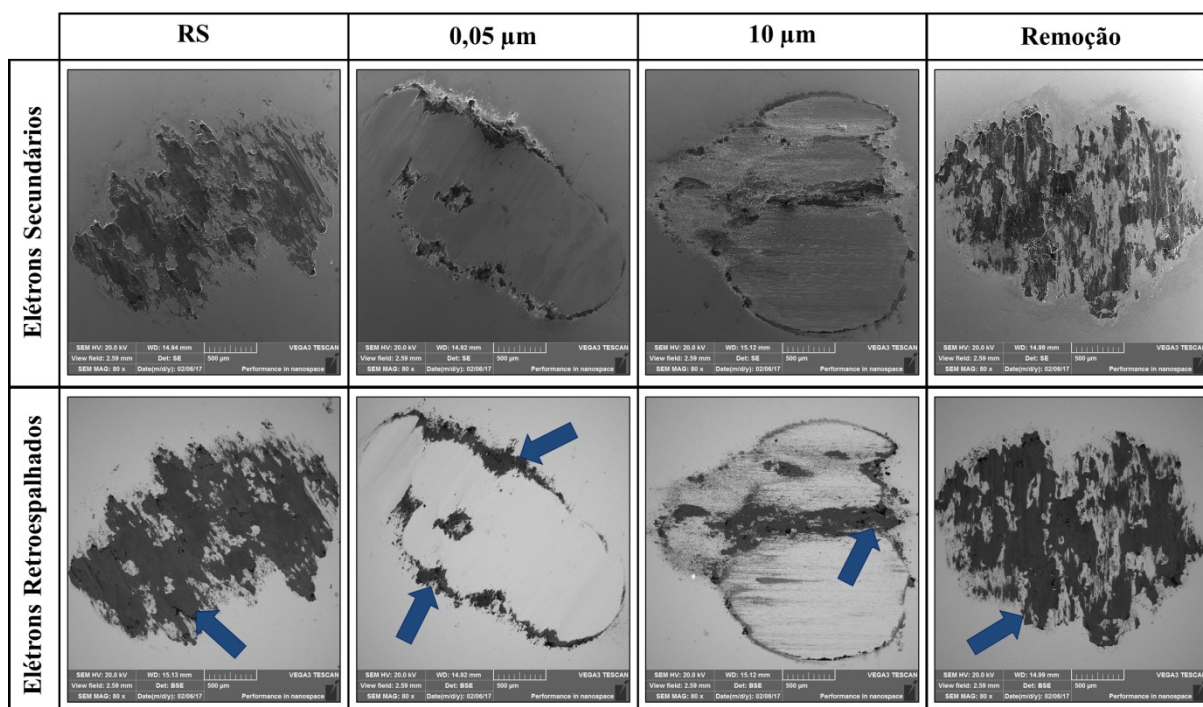


Figura 4.36: Imagens de MEV das marcas de desgaste típicas para os contra corpos.

A Figura 4.37 exibe uma marca de desgaste típica formada nos contra corpos, para as condições RS e Remoção. Observa-se, claramente, uma região com coloração mais escura (Figura 4.37-b), indicando a presença de materiais mais leves (área 1). As análises via EDS identificaram para a área 1 (Figura 4.37-c) traços de ferro e silício, com uma maior quantidade de oxigênio e a presença de alumínio, oriundos das amostras, sugerindo uma formação de tribocamadas, formadas principalmente de materiais oriundos das amostras. Já para a área 2, Figura 4.37-d, foram detectados materiais oxidados com as presenças de ferro e cromo,

materiais presentes na composição química dos contra corpos, com traços de alumínio e silício. Isto indica uma intensa competição entre formação e destacamento de tribocamadas na superfície dos contra corpos, onde na região 2, pode ser um local onde havia a presença de uma tribocamada que foi posteriormente arrancada.

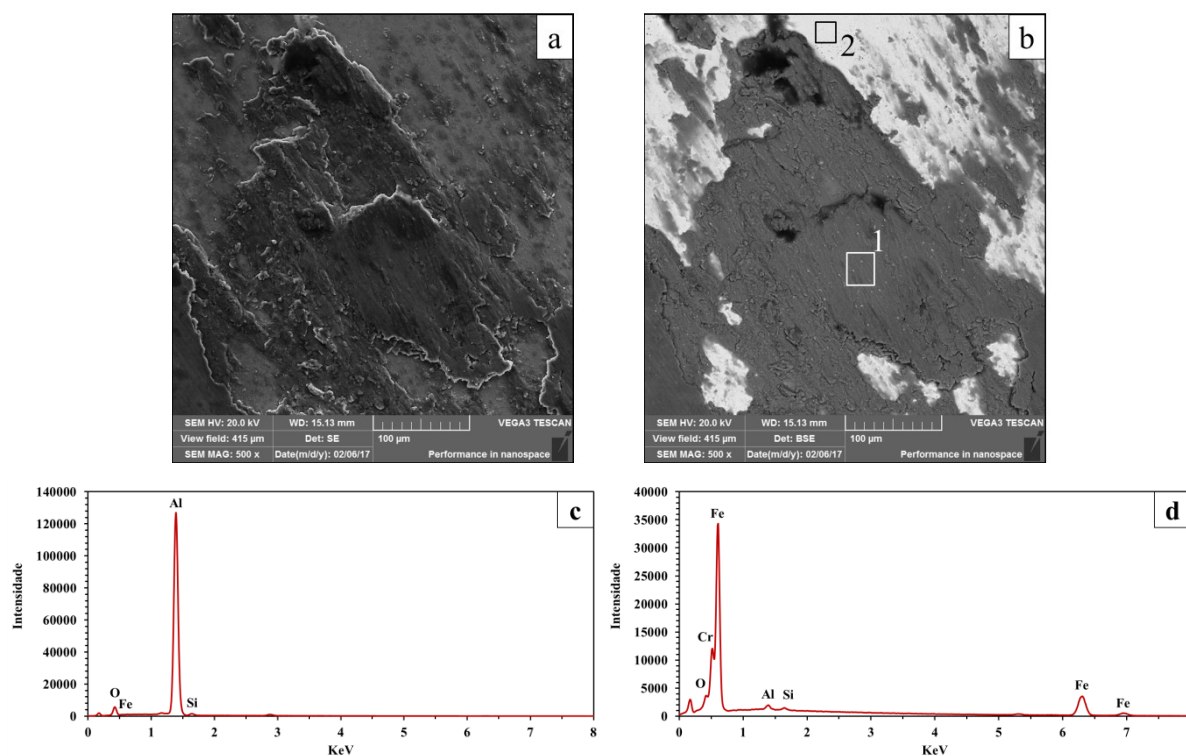


Figura 4.37: Detalhe típico das superfícies desgastadas dos ensaios RS e Remoção. (a) e (b) Imagem de MEV por elétrons Secundários e Retroespalhados respectivamente. (c) e (d) Espectros EDS para as áreas 1 e 2 respectivamente.

As condições com adição de partículas demonstraram comportamentos diferentes. A adição das menores partículas ( $0,05\ \mu\text{m}$ ) promoveu a formação de tribocamadas mais aglomeradas, porém a taxa de desgaste foi maior tanto para as amostras quanto para os contra corpos. Já quando adicionadas as maiores partículas ( $10\ \mu\text{m}$ ), estes ensaios revelaram uma taxa de desgaste das amostras e dos contra corpos semelhantes aos ensaios RS e Remoção. Adicionalmente as tribocamadas formaram-se mais espalhadas por toda a marca de desgaste. Ambas as condições com adição apresentaram aumentos no coeficiente de atrito.

A Figura 4.38 evidencia um detalhe típico da borda da marca de desgaste para os contra corpos ensaiados com adição de partículas de alumina. Nota-se uma adesão de materiais com menor intensidade (Figura 4.38-b) do que visto na Figura 4.37, concentrando-se principalmente nas bordas das marcas de desgaste, como mostrado anteriormente também na Figura 4.36. Análises EDS apresentam resultados para a área 1 (Figura 4.38-c) com as

presenças de alumínio e oxigênio, se revelando mais oxidadas que as camadas encontradas nos ensaios RS, provavelmente devido à maior quantidade de debris oxidados no contato. Já para a área 2 (Figura 4.38-d), praticamente não foi constatada a presença de alumínio na região mais clara (interior da marca de desgaste), com presenças de ferro, oxigênio e cromo, sendo materiais constituintes das esferas de aço. Este mesmo comportamento foi também observado nos ensaios com adição de óxidos de ferro, onde as tribocamadas se acumularam nas bordas das marcas de desgaste, podendo ser atribuído a uma maior quantidade de debris nestas regiões, associado a uma maior disponibilidade de energia, contribuindo para a formação destas tribocamadas.

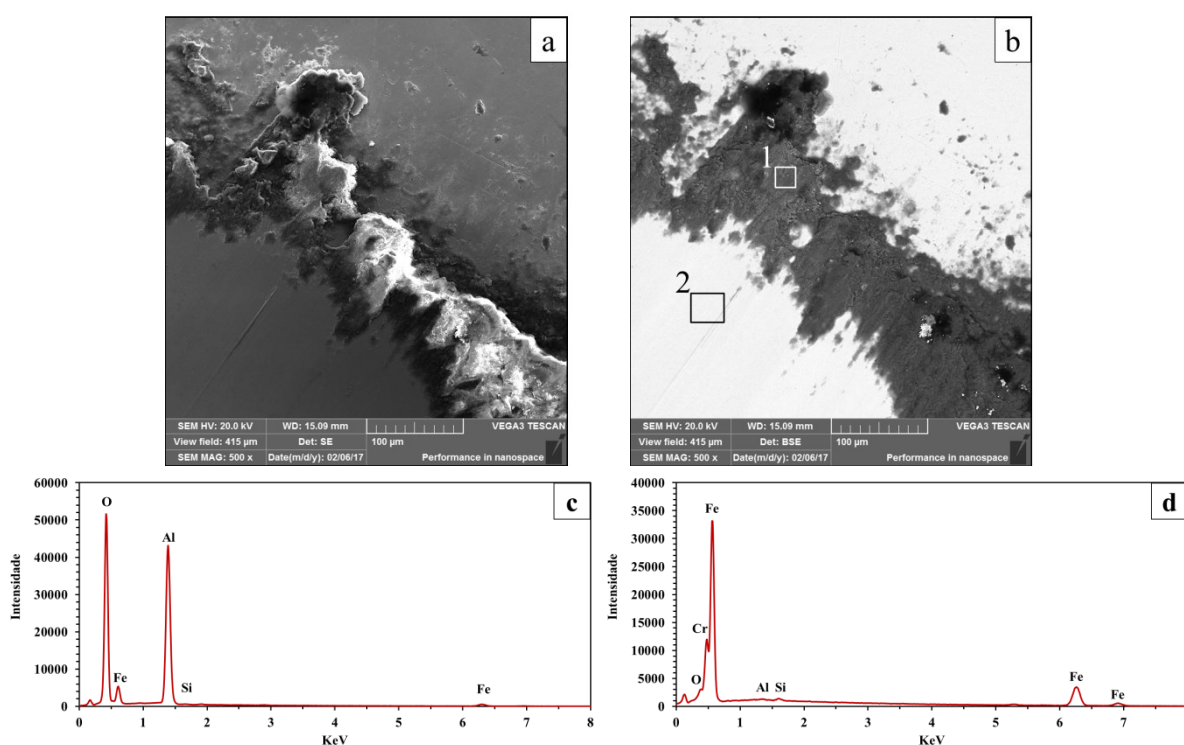


Figura 4.38: Detalhe típico da borda da marca de desgaste dos contra corpos dos ensaios com adição. (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2.

Adicionalmente foram feitos ensaios com adição controlada de partículas, na tentativa de simular apenas a quantidade de partículas que estariam presentes no contato, sem excesso, como feito anteriormente, pois em um contato real em sistema fechado, por exemplo, os debris que estariam participando do contato, seriam os próprios debris gerados durante o desgaste. Para isso uma pequena quantidade (~1mg) de partículas foi adicionada ao contato no início do ensaio.

Para estes ensaios foram usadas partículas com tamanhos diferentes dos anteriores, sendo de 20 nm, que é um tamanho ainda menor que para os ensaios anteriores, com a

intenção de verificar se em uma condição com debris ainda mais finos, estes fossem capazes de entrar mais facilmente no contato e pudessem contribuir na formação de tribocamadas e consequente redução do atrito e desgaste. Adicionalmente para efeito comparativo foram adicionadas partículas com  $3\ \mu\text{m}$ , sendo um tamanho mais próximo dos encontrados no regime de desgaste suave proposto por (HUTCHINGS, 1992). A Figura 4.39 revela mapas triboscópicos 3D do coeficiente de atrito para os ensaios realizados. Todas as condições ensaiadas apresentaram aspectos semelhantes, com o coeficiente de atrito maior no início do ensaio e decaindo ao longo do mesmo, como mostrado também pela Figura 4.40.

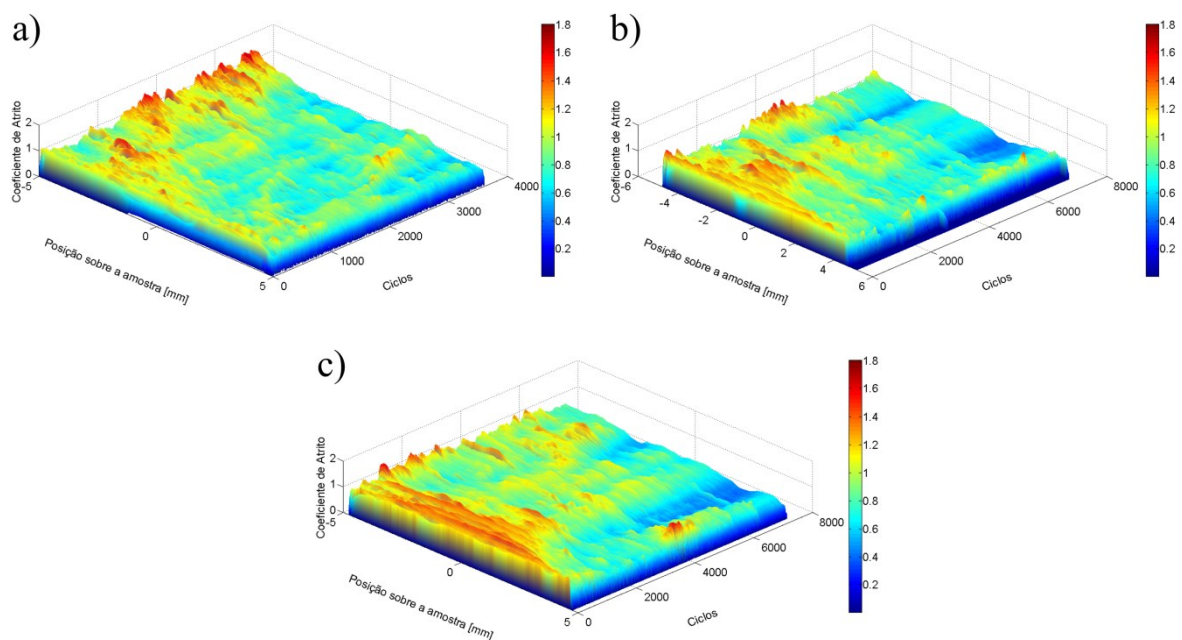


Figura 4.39: Evolução do coeficiente de atrito. (a) RS, (b) 20 nm, (c)  $3\ \mu\text{m}$ .

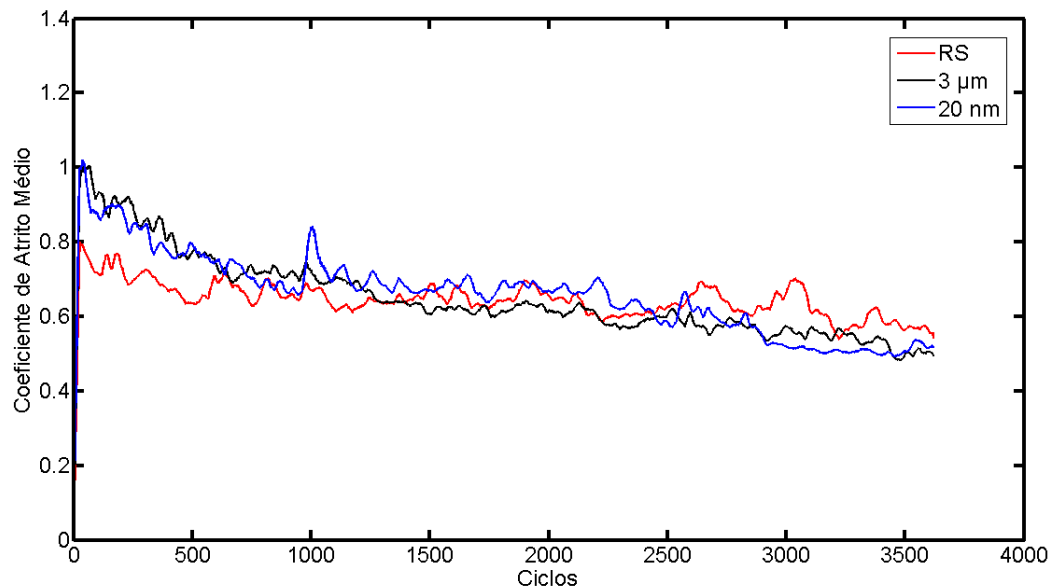


Figura 4.40: Coeficiente de atrito médio por ciclo.

A Figura 4.41 demonstra o coeficiente de atrito médio do regime permanente (após 1500 ciclos), onde não há diferença significativa no coeficiente de atrito quando adicionadas as partículas no contato (Analisado via ANOVA com 95% de confiabilidade), diferentemente do ocorrido para os com ensaios adição em excesso, onde os debris contribuíram para um aumento no coeficiente de atrito, e neste caso o coeficiente de atrito se manteve com valores próximos aos apresentados para os ensaios RS.

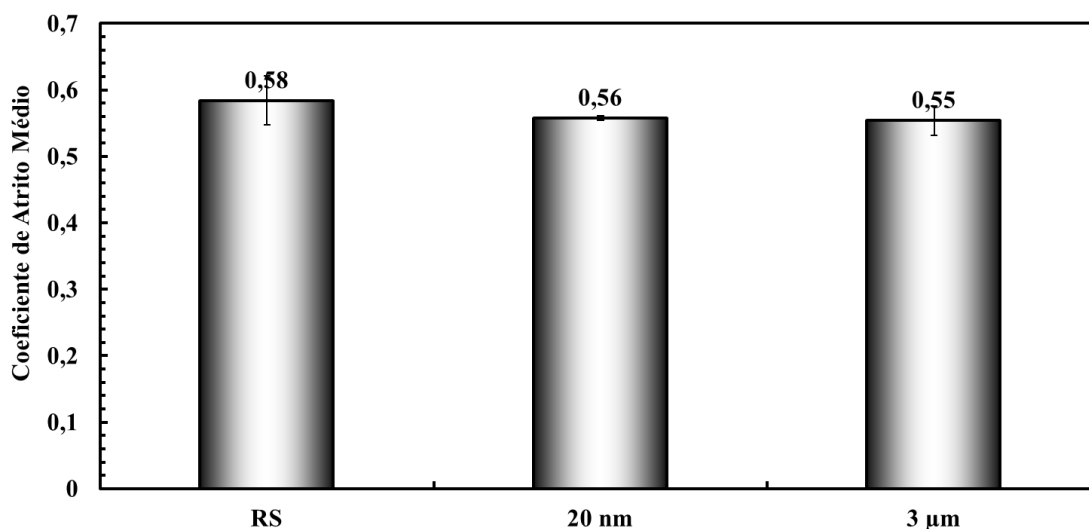


Figura 4.41: Coeficiente de atrito médio no regime permanente.

A adição de partículas com quantidade controlada não pareceu contribuir para quedas nas taxas de desgaste das amostras, como mostrado pela Figura 4.42. Análises via ANOVA, evidenciaram que não há diferenças nos valores com 95% de confiabilidade.

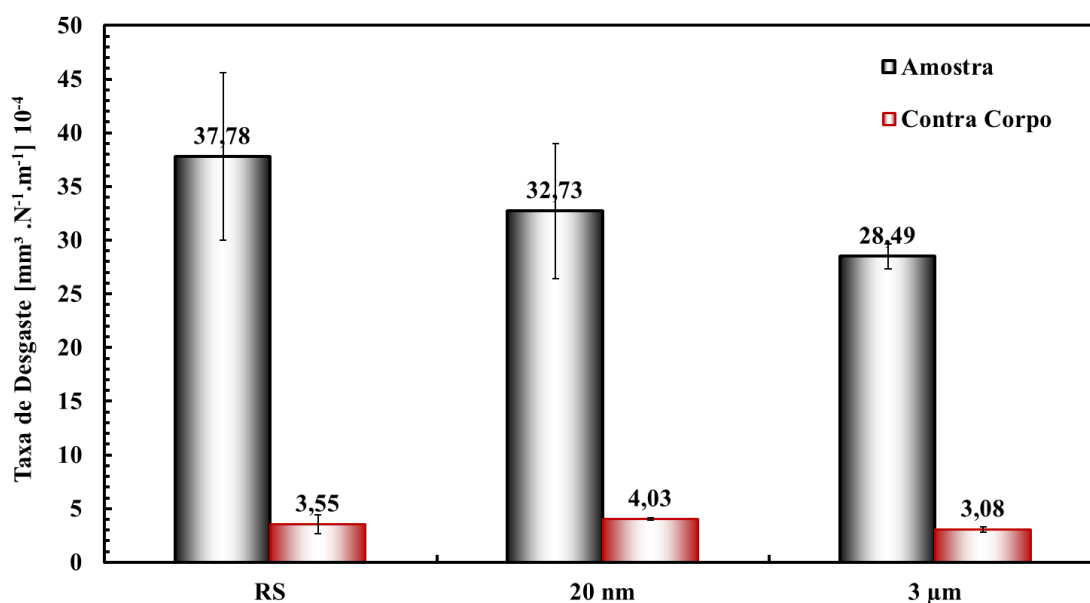


Figura 4.42: Taxa de desgaste do sistema.



Para os contra corpos, a taxa de desgaste apresentada foi uma ordem de grandeza menor que para as amostras, como ocorrido para os ensaios anteriores. Os ensaios com adição das menores partículas promoveram maiores taxas de desgaste para os contra corpos, revelando valores cerca de 30% maiores, quando comparados com os ensaios com adição das maiores partículas.

A Figura 4.43 ilustra um comparativo para as marcas de desgaste nas amostras ensaiadas. Percebe-se que a adição controlada de partículas também contribuiu para a formação de tribocamadas (setas brancas), como apresentado para os ensaios com adição em excesso. Porém, diferentemente do ocorrido anteriormente, as condições com adição revelaram marcas de desgaste similares entre si.

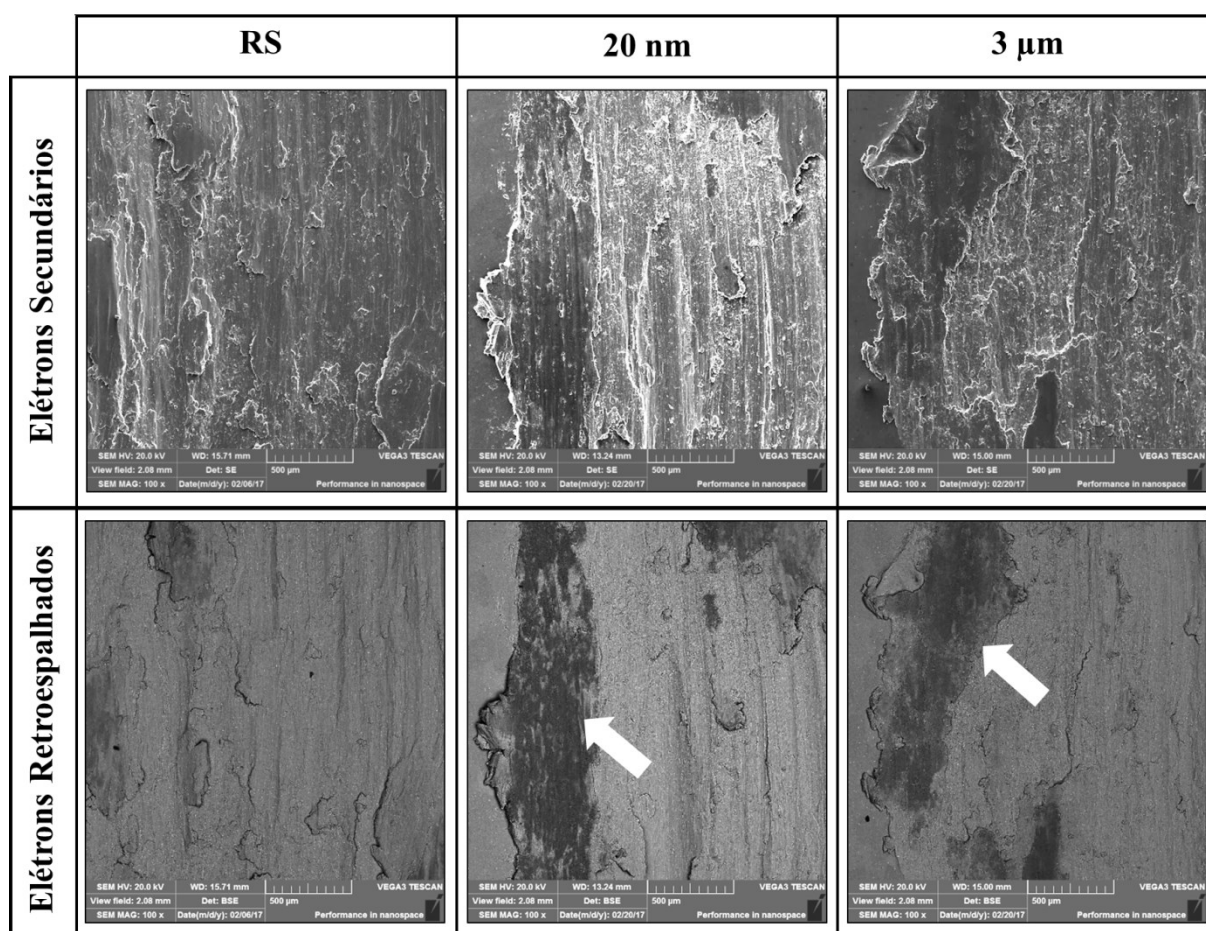


Figura 4.43: Imagens de MEV das marcas de desgaste das amostras.

A Figura 4.44 exibe com mais detalhes, uma marca de desgaste típica para as condições com adição de partículas. Nota-se uma maior quantidade de áreas mais escuras, do que ocorrido para os ensaios RS (Figura 4.33), e também uma menor quantidade de deformações plásticas (setas brancas), sendo uma superfície com uma aparência aparentemente mais lisa.

Nas Análises via EDS para a tribocamada, na região mais escura da Figura 4.44-b, (espectro na Figura 4.44-c) foi detectada a presença de oxigênio e alumínio e para a região mais clara (espectro na Figura 4.44-d), fora da tribocamada, somente alumínio com pouca ou nenhuma oxidação.

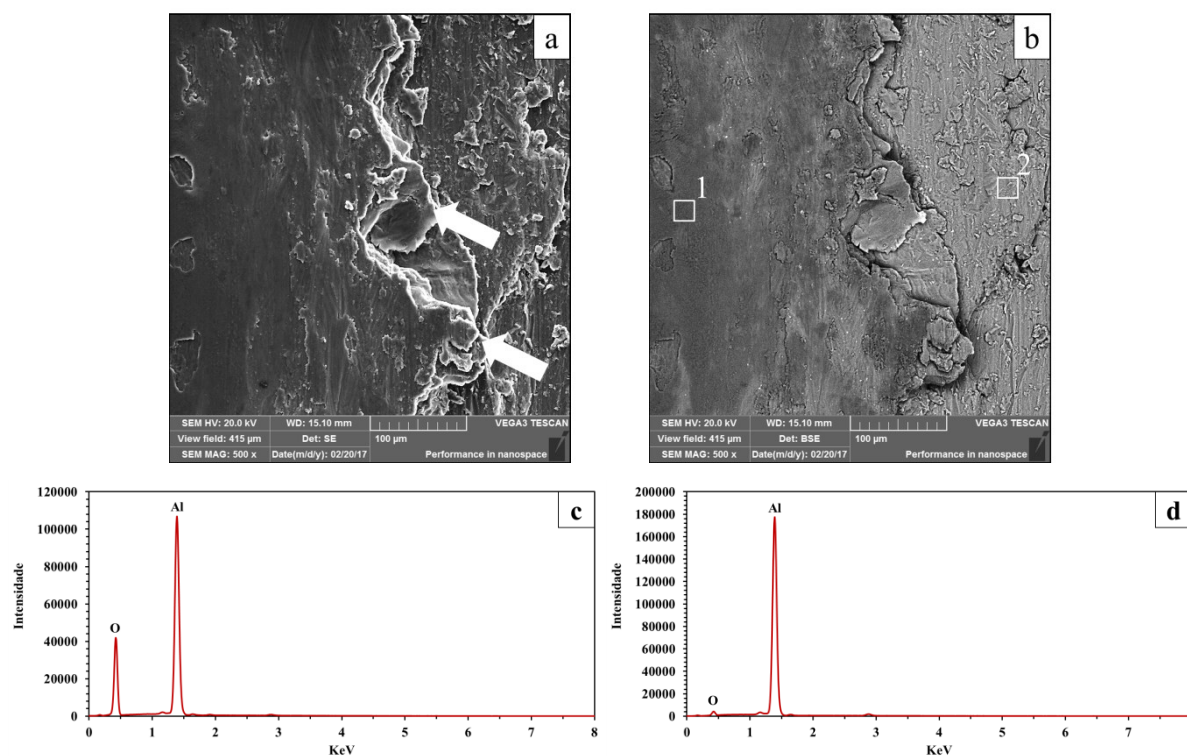


Figura 4.44: Detalhe de uma marca de desgaste típica para adição controlada. (a) e (b) Imagens de MEV via elétrons secundários e retroespalhados. (c) e (d) Espectros EDS para as áreas 1 e 2 respectivamente.

A Figura 4.45 exibe um comparativo para as marcas de desgaste típicas dos contra corpos. Aparentemente os mecanismos de desgaste foram similares para todas as condições, com formação de tribocamadas ao longo de toda a marca de desgaste, mostradas pelas setas azuis.

A Figura 4.46 revela um detalhe típico da tribocamada formada para os ensaios com adição controlada de partículas, onde pode se perceber na Figura 4.46-a e na Figura 4.46-b duas regiões muito distintas entre si sendo uma mais escura (tribocamada) e outra mais clara (material da esfera). A marca de desgaste apresentada para os ensaios com adição controlada, se mostrou similar aos ensaios RS e Remoção (Figura 4.37). A Figura 4.47 mostra um detalhe do interior de uma marca de desgaste dos contra corpos ensaiados com adição em excesso de partículas de alumina com 10  $\mu\text{m}$ , onde nota-se que aparentemente a maior quantidade de alumina, pareceu contribuir para um maior destacamento das tribocamadas, sendo estas

tribocamadas menos presentes no interior da marca de desgaste, quando comparados com os ensaios com adição controlada, como visto quando comparadas também a Figura 4.37 e a Figura 4.45.

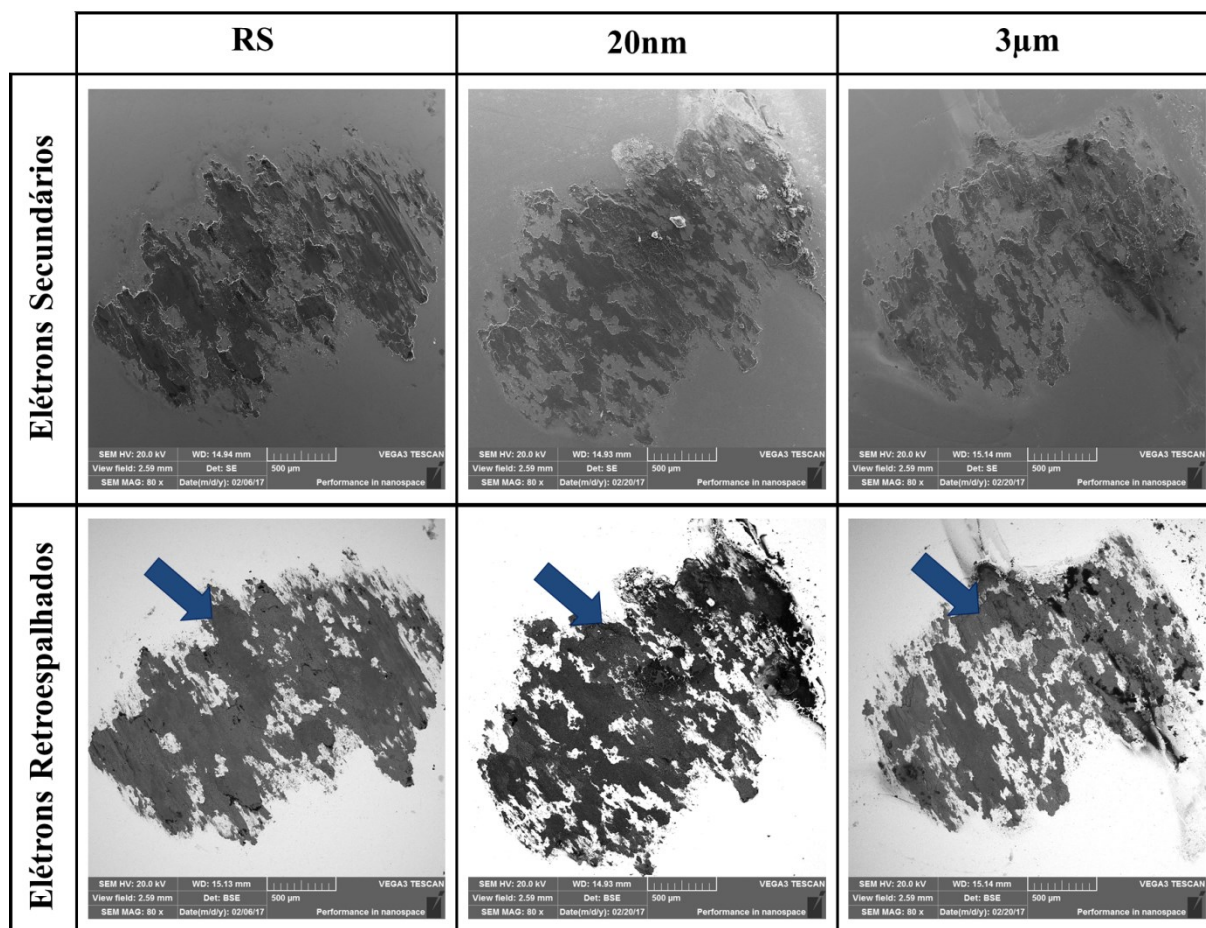


Figura 4.45: Imagens de MEV das marcas de desgaste dos contra corpos.

Análises via EDS mostraram que para a região mais escura (área 1 da Figura 4.46-b - Espectro na Figura 4.46-c) a tribocamada parece ser formada por alumínio e oxigênio, com traços de Ferro, como ocorrido para os contra corpos ensaiados com adição em excesso (Figura 4.47-c), provavelmente devido à maior quantidade de debris no contato com a adição, mesmo neste caso (Figura 4.46) adicionados em uma quantidade menor.

Para a região mais clara (área 2- Figura 4.46-d) foi encontrado oxigênio, e também, ferro, cromo e silício (presentes no material da esfera), assim como no caso representado pela Figura 4.47-d. Além disso, foi detectada também a presença de alumínio (material das amostras) podendo ser locais onde havia uma tribocamada e que foi arrancada, sugerindo uma competição entre formação e destacamento das tribocamadas formadas no contato.



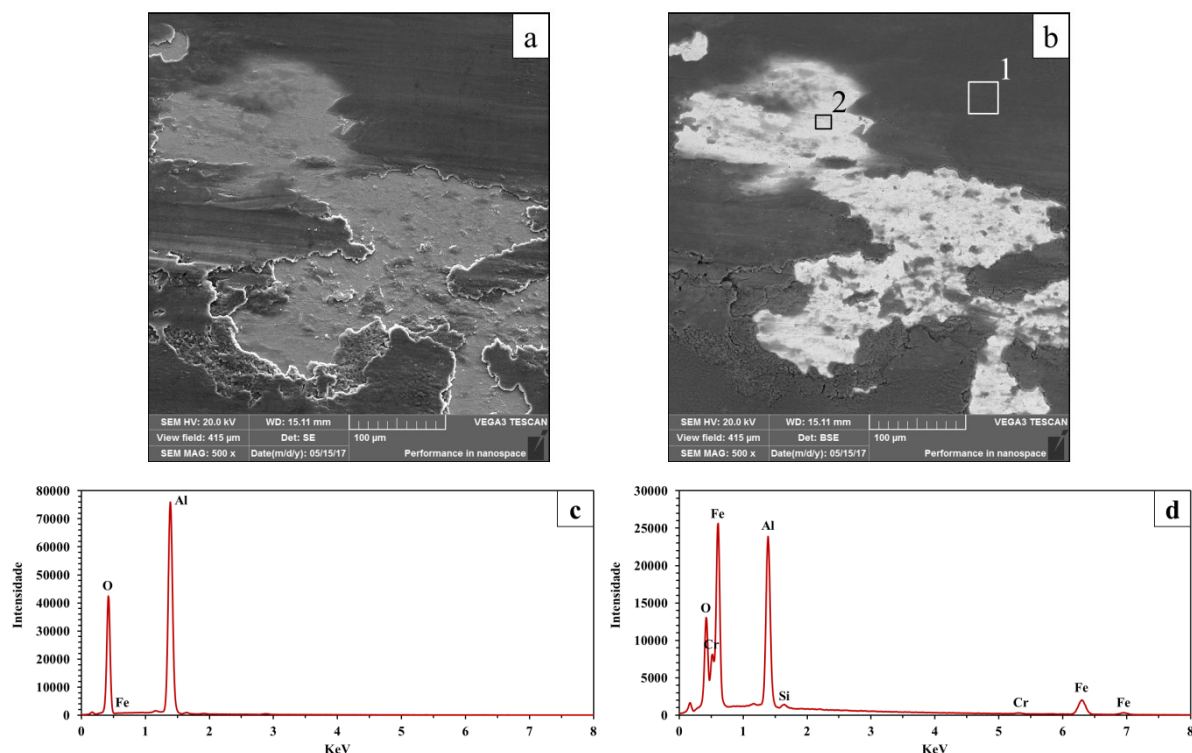


Figura 4.46: Detalhe típico do interior da marca de desgaste dos contra corpos ensaiados com adição controlada de partículas com 3µm. (a) e (b) Imagens de MEV por elétrons secundários e retroespalhados. (c) Análise EDS para a área 1. (d) Análise EDS para a área 2.

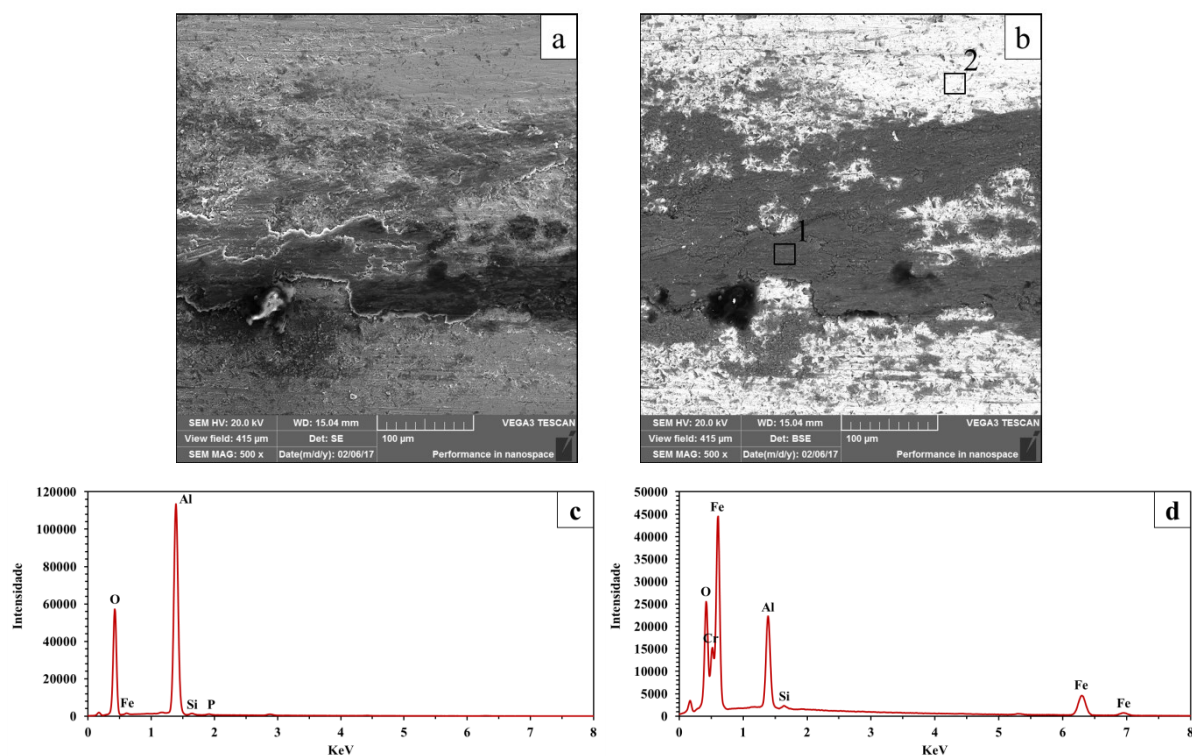


Figura 4.47: Detalhe típico do interior da marca de desgaste dos contra corpos ensaiados com adição de partículas com 10µm adicionadas em excesso. (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Análise EDS para a área 1, (d) Análise EDS para a área 2.

Portanto, a adição controlada de debris contribuiu para a formação de tribocamadas ao longo da marca de desgaste das amostras e também dos contra corpos. Esta adição de partículas não promoveu variação significativa no coeficiente de atrito, nem na taxa de desgaste das amostras, mas para os contra corpos, os ensaios com adição das maiores partículas promoveram a menor taxa de desgaste sendo cerca de 30% menor que para os ensaios com adição das menores partículas de alumina.

Os debris gerados em contatos com desgaste por deslizamento de alumínio foram estudados e caracterizados experimentalmente em termos da estrutura e composição química, por Kim, Windl e Rigney (KIM; WINDL; RIGNEY, 2007). Os resultados encontrados por eles sugerem que os debris formados não são essencialmente compostos por alumina, mas sim em parte, sendo também compostos por materiais hidroxilados. Os debris quando no contato podem sofrer reações triboquímicas, formando hidróxidos de alumina e alumina, como mostrado também por (CHERIF; GUEROULT; RIGAUD, 1997).

Então, com a intenção de simular a hidratação dos debris como apresentado pelos autores mencionados, e também promover uma maior circulação dos debris no contato, foram feitos ensaios submersos em solução de alumina + água destilada. Os ensaios tomados como referência (nomeados como “RAD”) foram feitos somente na presença de água destilada para coleta e análise dos debris. Na Figura 4.48-a é apresentada a morfologia dos debris coletados nos ensaios submersos, onde nota-se que estes possuem uma geometria arredondada. Na Figura 4.48-b é exibido um aglomerado destes, aparentemente altamente fragmentados. Adicionalmente foi feita uma análise EDS (Figura 4.48-c), revelando a presença de alumínio, oxigênio e traços de ferro, este último provavelmente oriundo do contra corpo.

A distribuição granulométrica mostrada na Figura 4.49-a mostra que 90% do volume total das partículas consistem em partículas menores que 14,23  $\mu\text{m}$ , 50% consistem em partículas menores que 8,14  $\mu\text{m}$  e 10% consistem em partículas menores que 2,71  $\mu\text{m}$ . A Razão de Aspecto, mostrada na Figura 4.49-b, indica que os debris possuem uma geometria mais arredondada, visto que as maiores quantidades encontram-se basicamente com valores de razão de aspecto acima de 0,6.

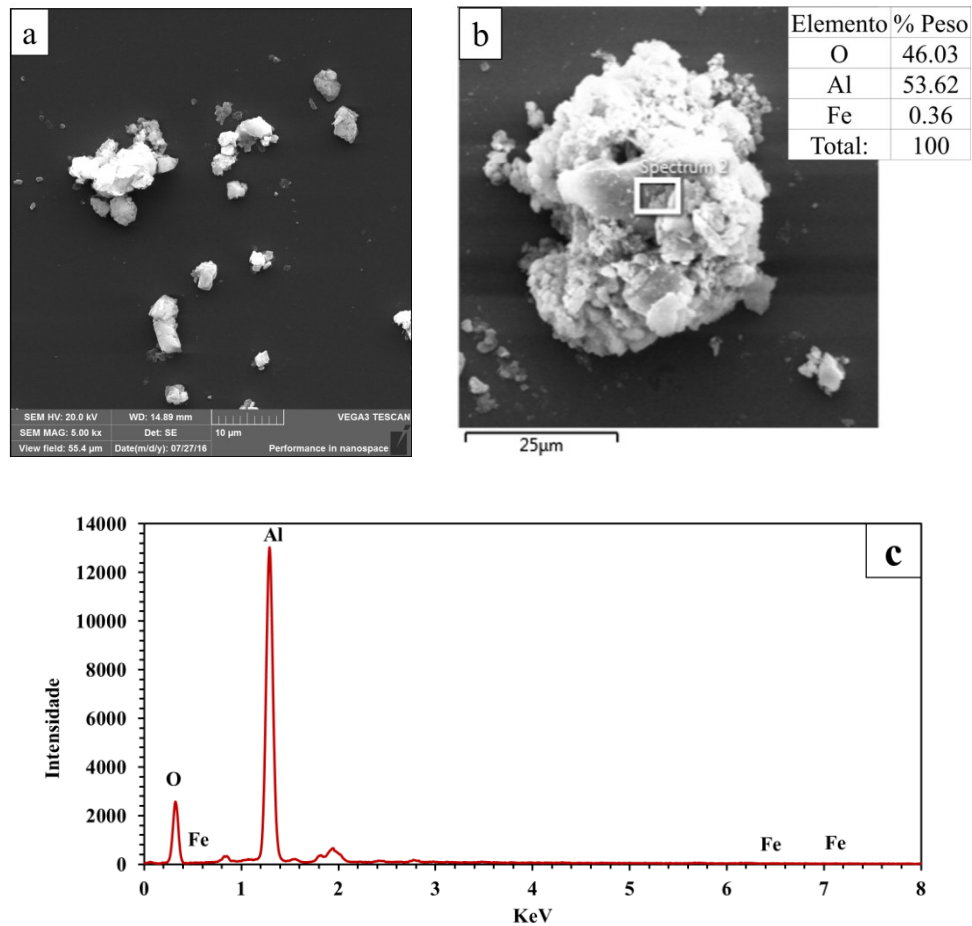


Figura 4.48: Imagens de MEV e análise EDS para os debris coletados nos ensaios submersos. (a) e (b) Imagens de MEV por elétrons secundários. (c) análise via EDS para a área 1.

Esta ampla variação de tamanho e formas reflete a intensa fragmentação que os debris geralmente sofrem no contato tribológico (KIM; WINDL; RIGNEY, 2007). Uma vez que os debris são formados, eles podem sofrer uma maior deformação, fragmentação e cominuição (JIANG; STOTT; STACK, 1998), de modo que as partículas maiores são formadas inicialmente e as partículas menores são geradas posteriormente (JIANG; STOTT; STACK, 1998; KIM; WINDL; RIGNEY, 2007).

Além disso, a influência da oxidação e umidade também contribui para uma diminuição do tamanho dos debris, onde em condições com maior umidade, há uma tendência em haver uma maior oxidação dos debris e uma diminuição no tamanho destes (DWIVEDI, 2006; KIM; KARTHIKEYAN; RIGNEY, 2007).

A presença de oxidação reduz a chance da ocorrência de contato metal-metal, uma vez que as camadas de óxidos (materiais cerâmicos) diminuem esta interação entre as asperidades uma vez metálicas, reduzindo o desgaste por adesão, promovendo uma mudança no regime de desgaste, onde os debris oxidados são removidos em partículas finas, das camadas de óxidos

formadas nas superfícies em contato, podendo causar uma mudança no regime de desgaste de severo para suave (LINGARD; FU; CHEUNG, 1984; HUTCHINGS, 1992).

Com base nestes resultados, as partículas de alumina com diâmetro de 0,05, 0,1, 1 e 10  $\mu\text{m}$  foram escolhidas para cobrir a gama de debris encontrados para o par tribológico alumínio-aço. A Figura 4.50 mostra imagens via MEV das partículas adicionadas ao contato. Nota-se que as partículas menores possuem geometrias mais arredondadas, enquanto as maiores possuem uma maior angulosidade.

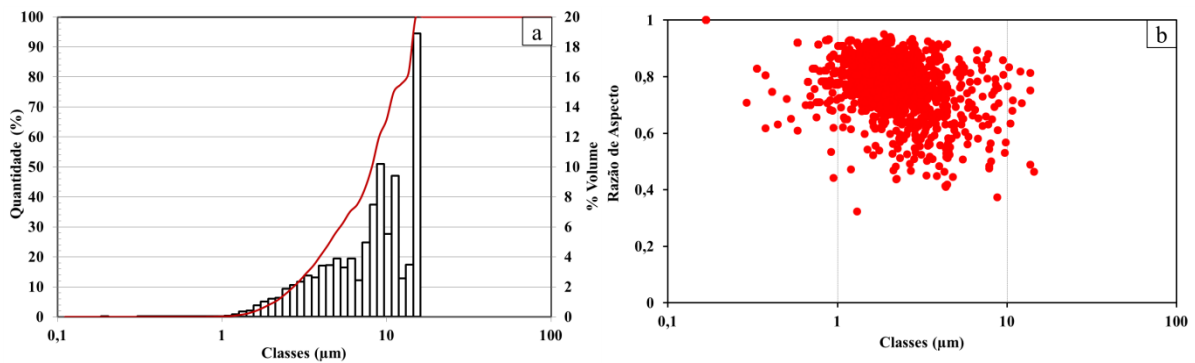


Figura 4.49: Distribuição granulométrica dos debris coletados nos ensaios submersos. (a) Distribuição granulométrica cumulativa (em volume); (b) Distribuição da Razão de Aspecto.

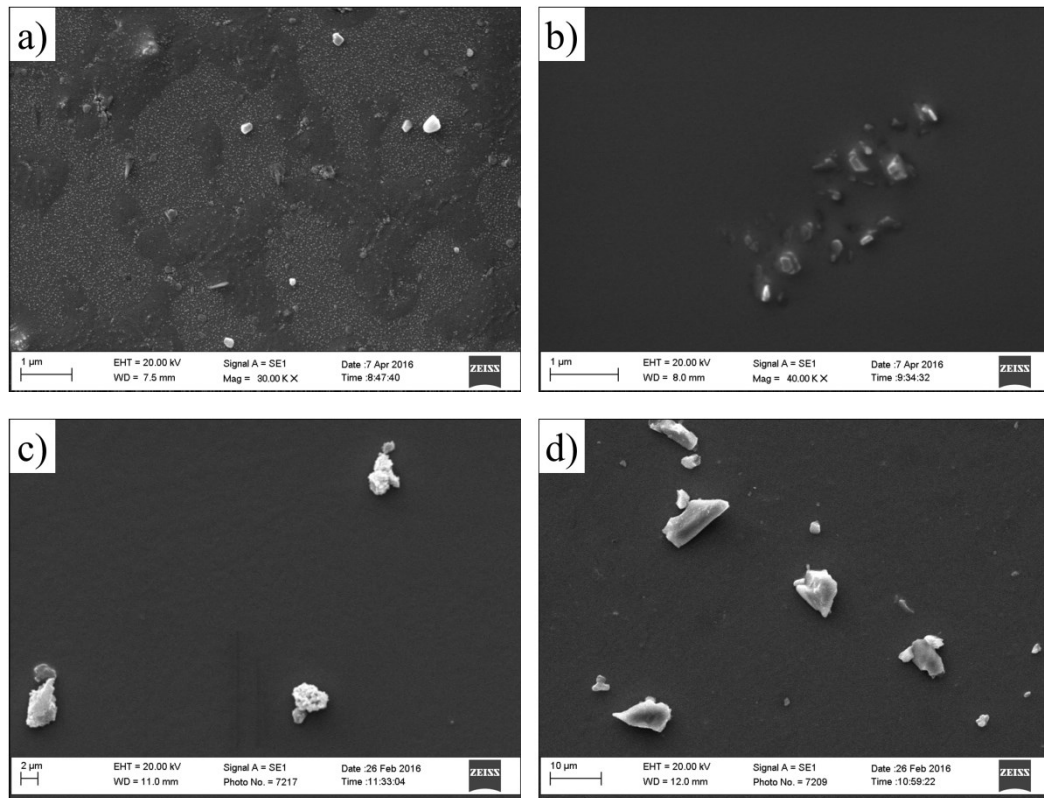


Figura 4.50: Imagens de MEV via elétrons secundários das partículas adicionadas. (a) 0,05  $\mu\text{m}$ , (b) 0,1  $\mu\text{m}$ , (c) 1  $\mu\text{m}$ , (d) 10  $\mu\text{m}$ .

Os ensaios foram feitos também com carga normal de 7 N e com duração de 30 minutos. A Figura 4.51 ilustra a evolução do coeficiente de atrito com o número de ciclos e a posição sobre a amostra para os ensaios realizados. Os mapas triboscópicos 3D são típicos para cada situação ensaiada. A evolução do coeficiente de atrito com o número de ciclos mostra que para todas as condições testadas existe um transiente inicial associado com o início do contato entre a amostra e o contra corpo antes do estado de regime permanente ser atingido. A variação do coeficiente de atrito com a posição sobre a amostra, retrata que para os ensaios RAD (Figura 4.51-a) e com partículas de  $0,1\ \mu\text{m}$  (Figura 4.51-b), o coeficiente de atrito aumenta nos pontos mortos do movimento alternado. Este aumento do coeficiente de atrito pode ser associado ao acúmulo de debris nas extremidades da marca de desgaste, como já comentado anteriormente, porém este efeito não foi visível para as partículas maiores. Adicionalmente as cores nos mapas triboscópicos mostram claramente que com o aumento do tamanho das partículas de alumina adicionadas no contato, o coeficiente de atrito diminui substancialmente ao longo do regime permanente em todas as posições da marca de desgaste.

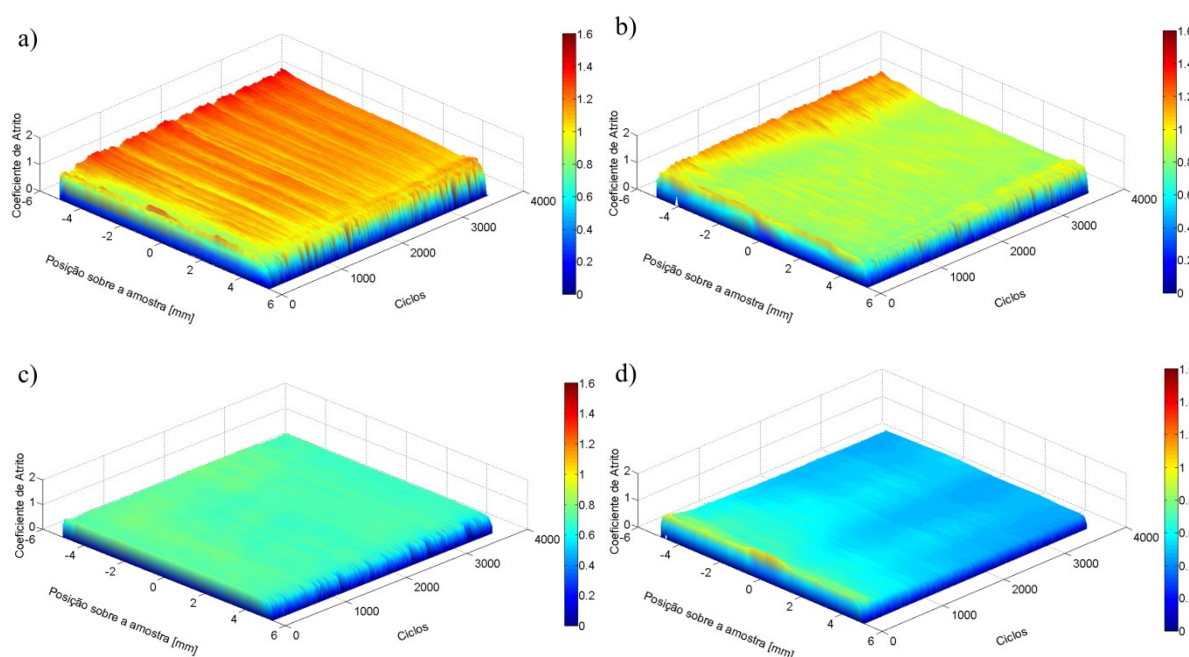


Figura 4.51: Evolução do coeficiente de atrito. (a) RAD, (b)  $0,1\ \mu\text{m}$ , (c)  $1\ \mu\text{m}$ , (d)  $10\ \mu\text{m}$ .

A Figura 4.52 retrata a evolução do coeficiente de atrito típico para todas as condições testadas. Estas curvas evidenciam mais claramente a tendência do coeficiente de atrito cair com o aumento das partículas adicionadas ao contato. Adicionalmente, nota-se que os ensaios feitos com a adição das partículas de alumina apresentaram menores flutuações nos valores de



coeficiente de atrito, sendo esta variação cada vez menor para os ensaios com as partículas maiores.

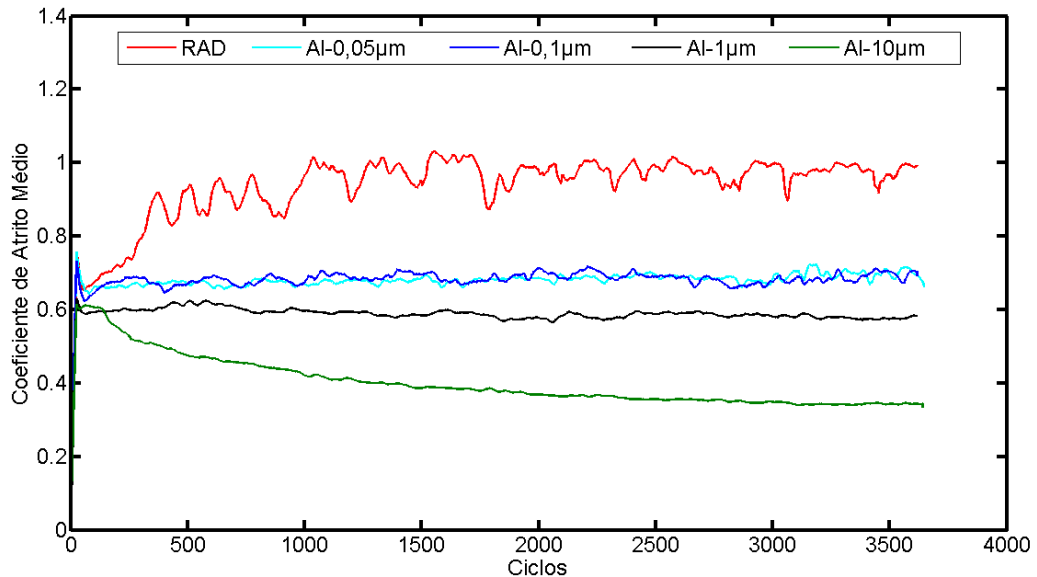


Figura 4.52: Evolução do coeficiente de atrito em função do número de ciclos.

Os coeficientes de atrito médios foram calculados no regime permanente (a partir dos 1000 ciclos) para as 4 repetições ensaiadas para cada condição. Nota-se, na Figura 4.53, que a diminuição do coeficiente de atrito, está relacionada com o aumento do tamanho das partículas de alumina adicionadas, e ainda, que as barras de desvio padrão decrescem para as partículas maiores.

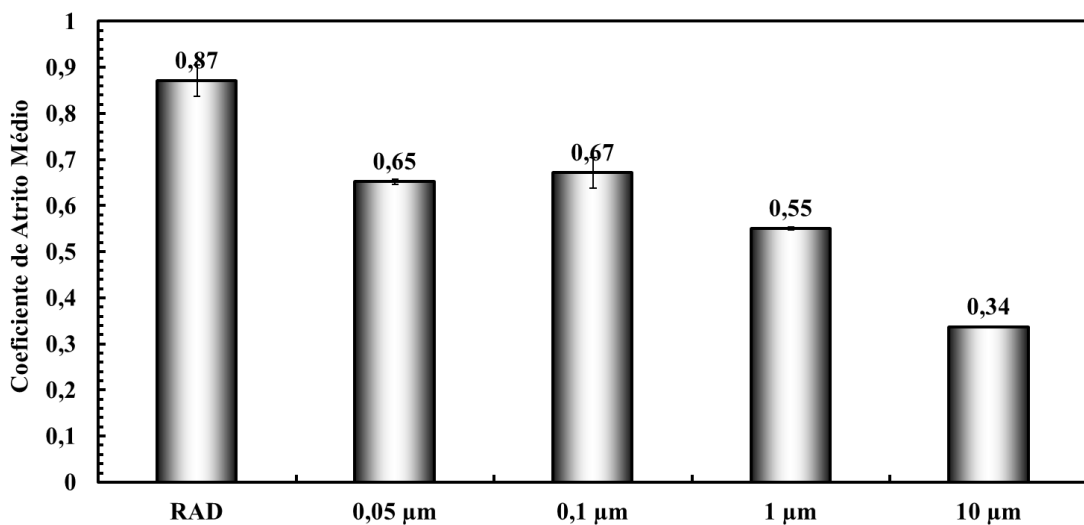


Figura 4.53: Valores médios do coeficiente de atrito no regime permanente.

A Figura 4.54 mostra a taxa de desgaste do sistema para as amostras e os contra corpos. Os testes com 0,05 μm e 0,1 μm não apresentaram estatisticamente diferenças significativas

na taxa de desgaste das amostras quando comparados com os ensaios RAD, enquanto que, para os ensaios com as partículas maiores (1  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ ) a taxa de desgaste das amostras apresentou-se com valores negativos, indicando um ganho de massa. Para os contra corpos, as taxas de desgaste para os ensaios com as partículas menores (0,05  $\mu\text{m}$  e 0,1  $\mu\text{m}$ ) foi menor que para os ensaios RAD e decresceram com o aumento do tamanho das partículas adicionadas. Por outro lado, a taxa de desgaste dos contra corpos ensaiados com as partículas maiores foi substancialmente maior que para os ensaios RAD e aumentou com o aumento do tamanho das partículas adicionadas.

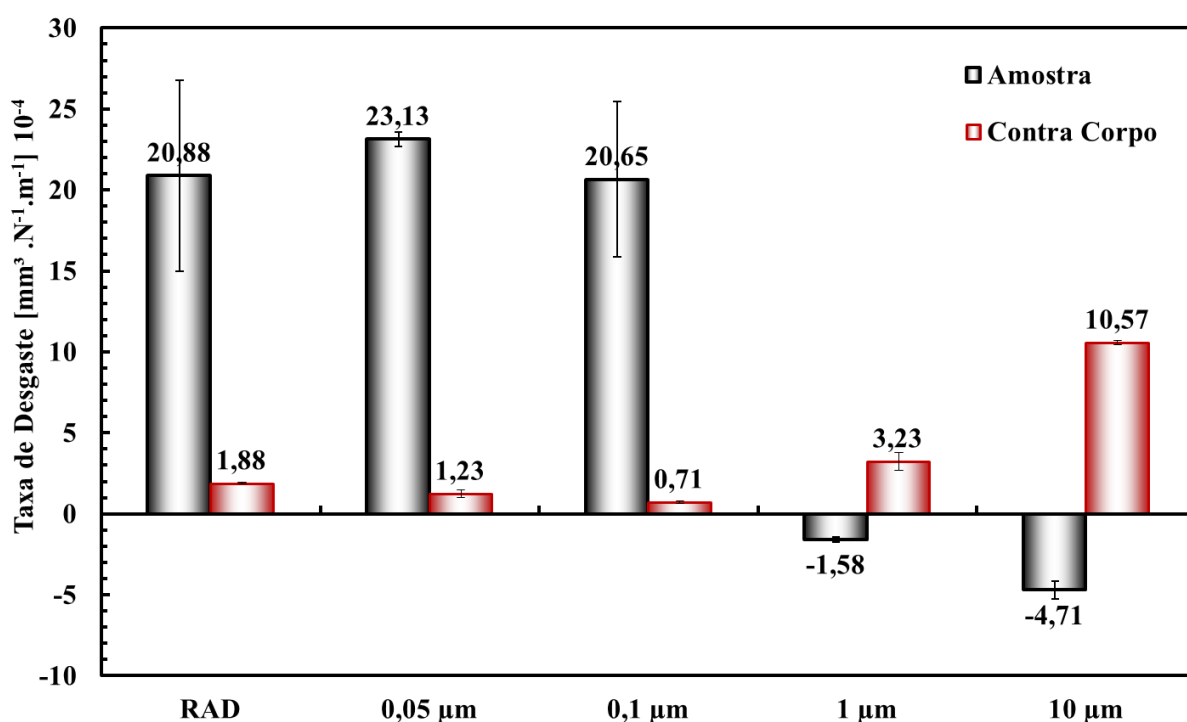


Figura 4.54: Taxa de desgaste do sistema.

A Figura 4.55 mostra imagens típicas produzidas por interferometria laser das marcas de desgaste das amostras. Os mapas 3D revelam as áreas centrais das marcas de desgaste e o comprimento analisado para cada marca de desgaste foi o mesmo. Comparando a Figura 4.55-a e a Figura 4.55-b, os ensaios com adição das partículas menores de alumina apresentaram uma marca de desgaste mais lisa e menor que os ensaios RAD. Por outro lado, os ensaios com adição das maiores partículas (Figura 4.55-c e Figura 4.55-d) resultaram em formação de tribocamadas, gerando ganho de massa, onde a largura da camada de material transferido foi maior e mais contínua para a maior partícula de alumina adicionada (10  $\mu\text{m}$ , Figura 4.55-d).

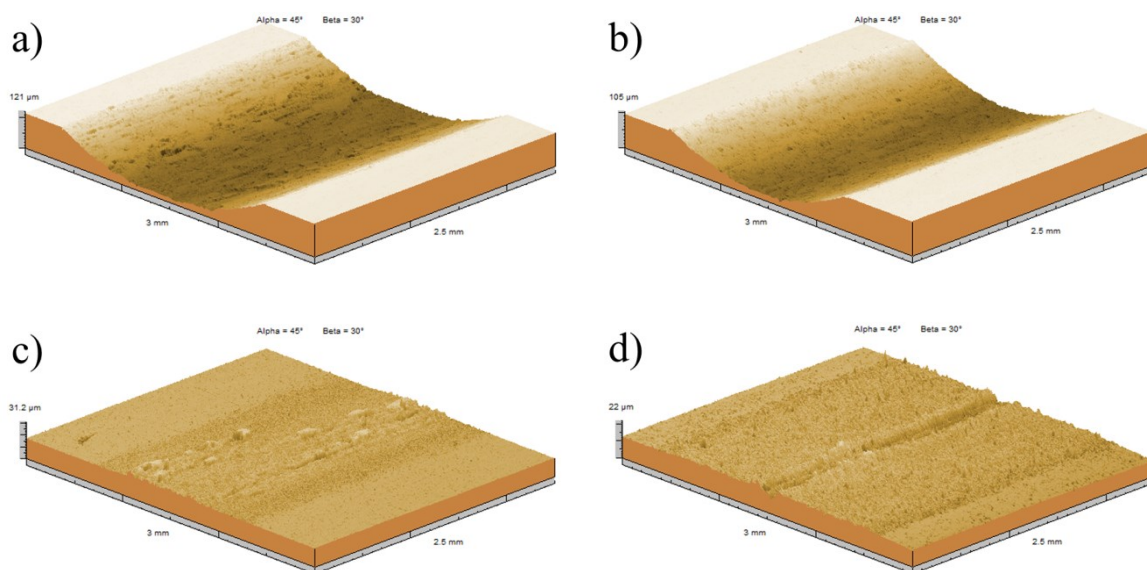


Figura 4.55: Projeções axonômétricas das marcas de desgaste das amostras, via interferometria laser. a) RAD; b) 0,1  $\mu\text{m}$ ; c) 1  $\mu\text{m}$ ; d) 10  $\mu\text{m}$ .

As observações apontadas na Figura 4.55, foram confirmadas através das análises feitas por MEV das marcas de desgaste, como apresentado pela Figura 4.56. A marca de desgaste se mostrou mais lisa para os ensaios com 0,1  $\mu\text{m}$ , quando comparada com os ensaios RAD, possui uma maior quantidade de ilhas de tribocamadas, reveladas mais claramente pelas imagens via elétrons retroespalhados (comparação entre a Figura 4.56-e e Figura 4.56-f). Quando as partículas maiores foram adicionadas ao contato, as tribocamadas formadas nas marcas de desgaste das amostras apresentaram uma maior homogeneidade em sua composição, como mostrado pela Figura 4.56-g e Figura 4.56-h (imagens via elétrons retroespalhados), em particular para os ensaios com a partícula de maior tamanho (10  $\mu\text{m}$ ), que apresentaram uma marca de desgaste com maior largura, (imagem via elétrons secundários Figura 4.56-d) e homogênea em sua composição (Figura 4.56-h).

As marcas de desgaste produzidas nas amostras foram analisadas em maiores detalhes via MEV. A Figura 4.57 exibe imagens via MEV e análises via EDS para os ensaios RAD. As ilhas de tribocamadas formadas se mostraram com muitas trincas (Figura 4.57-a). A imagem via elétrons retroespalhados (Figura 4.57-b) e a análise via EDS (Figura 4.57-c), revelam que essas ilhas de tribocamadas são muito oxidadas contendo pequenas quantidades de Ferro. A literatura mostra que considerando sistemas envolvendo o desgaste de metais, os debris podem sofrer grandes deformações e fragmentações, além de interações químicas, como a oxidação, como comentado anteriormente (CHEN, 1990; JIANG; STOTT; STACK, 1998; SALVARO et al., 2016).

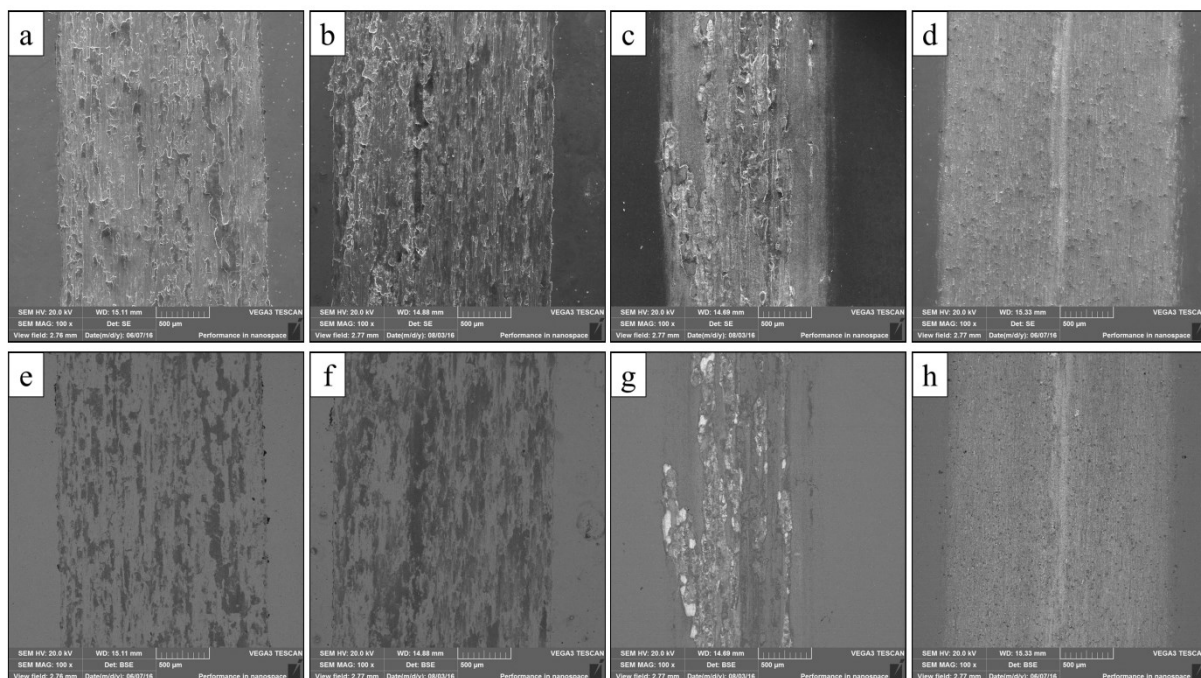


Figura 4.56: Imagens de MEV das marcas de desgaste nas amostras. Acima imagens via elétrons secundários e abaixo via elétrons retroespalhados. (a) e (e) RAD; (b) e (f) 0,1  $\mu\text{m}$ ; (c) e (g) 1  $\mu\text{m}$ ; (d) e (h) 10  $\mu\text{m}$ .

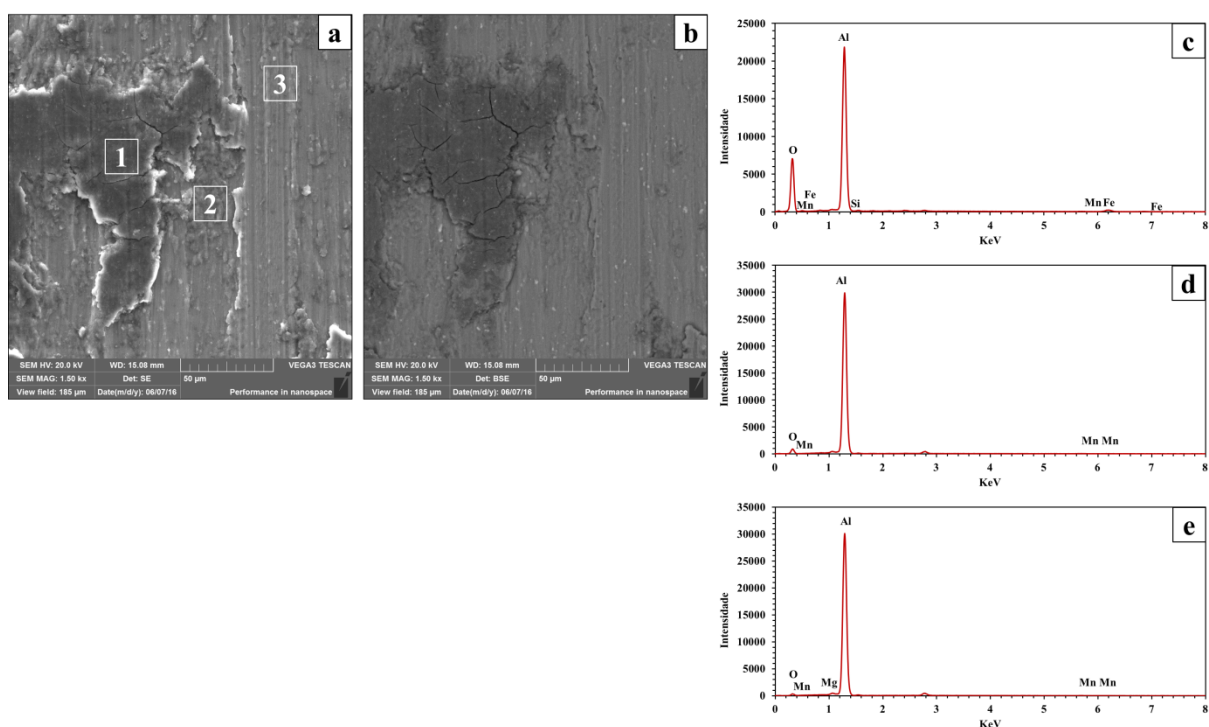


Figura 4.57: Detalhe da marca de desgaste nas amostras dos ensaios RAD: (a) Imagem de MEV por elétrons secundários. (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados. (c) Análise via EDS para a região 1. (d) Análise via EDS para a região 2. (e) Análise via EDS para a região 3.

Sendo assim, no presente trabalho, a formação dessas tribocamadas parece ser principalmente através dos debrís destacados das amostras de alumínio, mas também há misturas com materiais advindos dos contra corpos de aço. A área 2 (apresentada na Figura 4.57-a) mostra um desses processos de aglomeração e compactação ainda em progresso, e portanto, a quantidade de oxigênio (Figura 4.57-d) é significativamente menor, enquanto que a área 3, é principalmente composta por alumínio (Figura 4.57-e). A análise da marca de desgaste produzida nas amostras dos ensaios com 0,1  $\mu\text{m}$  revelaram tendências similares, como mostrado na Figura 4.58, onde a única diferença é uma maior quantidade de ilhas de tribocamadas.

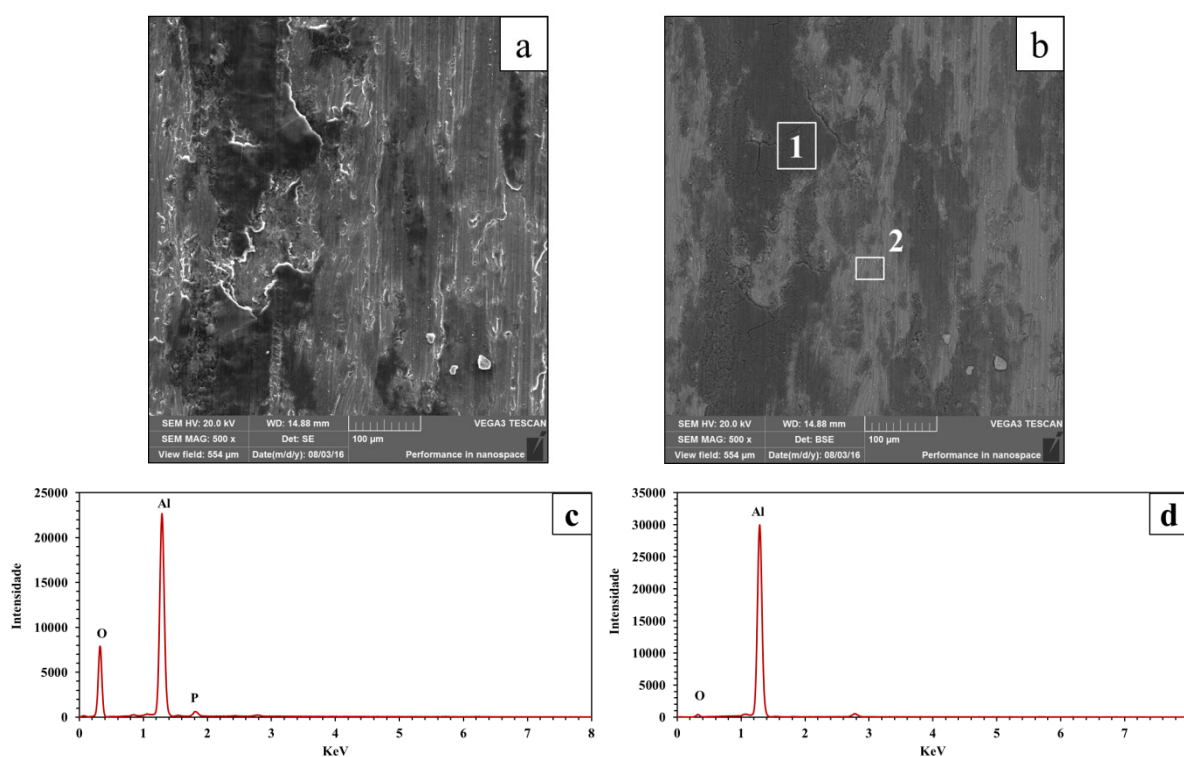


Figura 4.58: Detalhe da marca de desgaste nas amostras ensaiadas com 0,1  $\mu\text{m}$ : (a) Imagem de MEV por elétrons secundários. (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados. (c) Análise via EDS para a região 1. (d) Análise via EDS para a região 2.

Por outro lado, as marcas de desgaste produzidas nas amostras ensaiadas com as maiores partículas foram substancialmente diferentes. São retratados na Figura 4.59, detalhes das marcas de desgaste para os ensaios usando partículas com 1  $\mu\text{m}$ . A Figura 4.59-a exibe tribocamadas mais contínuas, e quimicamente mais homogêneas (Figura 4.59-b). Mesmo análises com maiores ampliações das regiões marcadas com “1” (Figura 4.59-c) e “2” (Figura 4.59-d), revelam que ambas as regiões são de fato formadas por aglomeração e compactação de debrís muito mais finos, mas com composição química mais homogênea na área “2” do



que na área “1”. Os espectros (Figura 4.59-e e Figura 4.59-f) mostram que as tribocamadas são muito mais oxidadas e ricas em ferro em “1” do que em “2”, sendo portanto, materiais oriundos dos contra corpos que foram transferidos durante o deslizamento para as amostras e participaram na formação das tribocamadas.

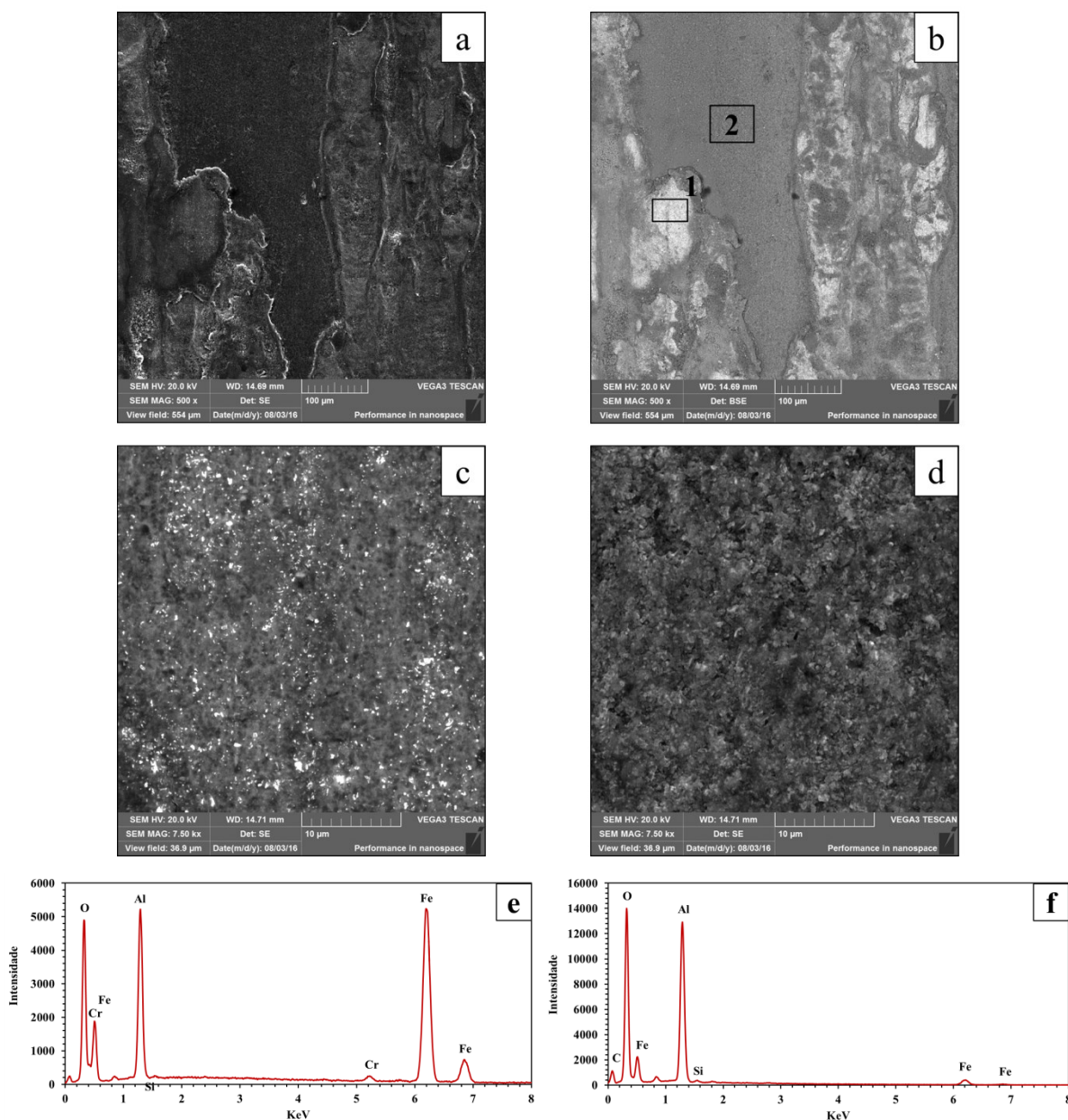


Figura 4.59: Detalhe da marca de desgaste nas amostras ensaiadas com 1  $\mu\text{m}$ : (a) Imagem de MEV por elétrons secundários. (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados. (c) Detalhe da região 1. (d) Detalhe da região 2. (e) Análise via EDS para a região 1. (f) Análise via EDS para a região 2.

A tribocamadas formadas nas amostras ensaiadas com a partícula de maior tamanho (10  $\mu\text{m}$ ) são muito mais contínuas (Figura 4.60-a), e quimicamente mais homogêneas (Figura 4.60-b), do que as tribocamadas formadas nas amostras ensaiadas com 1  $\mu\text{m}$  (Figura 4.59). As

análises EDS (área 1 - Figura 4.60-a) mostraram que essas tribocamadas são basicamente compostas de alumínio (Figura 4.60-d), grandes quantidades de ferro e altamente oxidadas. Ocasionalmente, esta tribocamada contínua apresentou algumas partículas isoladas (Figura 4.60-c – Ponto 2), e que é provavelmente uma partícula de alumina (Figura 4.60-e) que ficou presa na tribocamada (ou até mesmo foi ponto de ancoramento para a formação da tribocamada), e que não sofreu prévia fragmentação, deformação, aglomeração e não se misturou com outros materiais presentes na tribocamada.

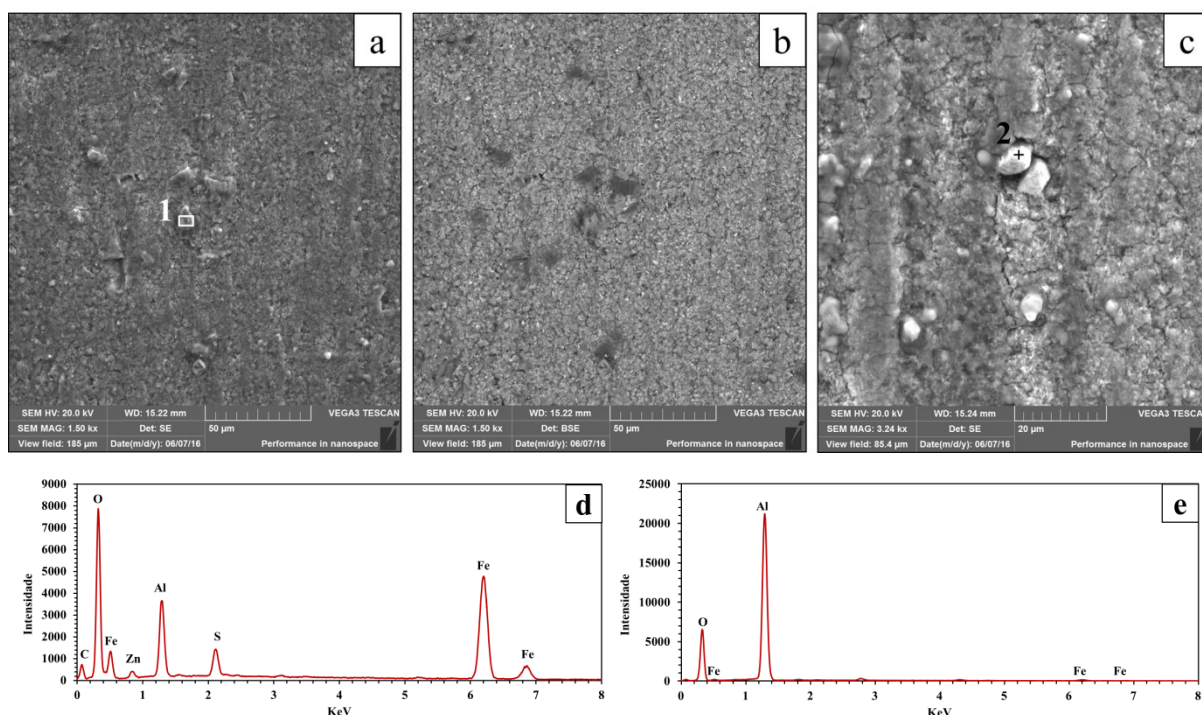


Figura 4.60: Detalhe da marca de desgaste nas amostras ensaiadas com 10  $\mu\text{m}$ : (a) Imagem de MEV por elétrons secundários. (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados. (c) Detalhe com maior ampliação de uma região contendo algumas partículas isoladas. (d) Análise via EDS para a região 1. (e) Análise via EDS para a região 2.

As marcas de desgaste produzidas nos contra corpos também foram analisadas, como uma ferramenta adicional para explicar a significativa transição no coeficiente de atrito e nas taxas de desgaste, observados quando as partículas maiores de alumina foram usadas. As marcas de desgaste são mostradas na Figura 4.61, onde a coluna da esquerda exibe toda a marca de desgaste, e a coluna da direita revela detalhes dentro das marcas de desgaste com maiores ampliações. Para os ensaios RAD (Figura 4.61-a e Figura 4.61-b) e para os ensaios com 0,1  $\mu\text{m}$  (Figura 4.61-c e Figura 4.61-d), as setas azuis indicam a presença de tribocamadas formadas na superfície dos contra corpos. Análises EDS dessas regiões mostraram que são compostas principalmente de alumínio, ferro e oxigênio. Por outro lado, as

marcas de desgaste dos contra corpos usados nos ensaios com partículas de 1  $\mu\text{m}$  (Figura 4.61-c) e 10  $\mu\text{m}$  (Figura 4.61-d), apresentaram marcas de abrasão (setas brancas) e ainda exibiram marcas de desgaste distintas e maiores (o tamanho aumentou de 1  $\mu\text{m}$  para 10  $\mu\text{m}$ ). Isto sugere que os debris duros e maiores, incorporados à tribocamada formada nas amostras, poderiam agir como protuberâncias, levando ao desgaste abrasivo nos contra corpos. Adicionalmente as marcas de desgaste também mostraram formas diferentes, tendenciando a formas mais circulares, com o aumento do tamanho das partículas adicionadas. As formas diferentes das marcas de desgaste são devido às diferentes trilhas de desgaste formadas nas amostras (Figura 4.55), onde para os ensaios RAD e para os ensaios com 0,1  $\mu\text{m}$  as marcas de desgaste das amostras possui uma profundidade maior, levando a uma marca de desgaste elíptica na superfície dos contra corpos. Por outro lado, para os ensaios com 1  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ , a marca de desgaste das amostras possui uma superfície plana e aliado ao desgaste abrasivo sofrido por estes contra corpos, os levaram a apresentar marcas de desgaste com forma circular na superfície dos contra corpos. A literatura é abundante em trabalhos que mostram diferenças nas formas das marcas de desgaste dos contra corpos (WHITENTON; BLAU, 1988; XIA; LI, 2008; SHI et al., 2011; FU et al., 2012; CAO et al., 2016; MANISCALCO et al., 2016). Muitos deles relacionam esta mudança da geometria da marca de desgaste dos contra corpos esféricos (ou com pontas circulares) com a mudança da forma da marca de desgaste do corpo (plano), seja ela via desgaste ou por deformação plástica, como reportado por Fu e colaboradores (FU et al., 2012), onde foram testados revestimentos DLC depositados em substratos diferentes. A deformação do substrato foi fator importante na mudança da geometria da trilha de desgaste dos discos revestidos por DLC e também nos contra corpos esféricos, onde quando o substrato sofria uma deformação maior, esta influenciava causando uma geometria elíptica no contra corpo esférico e, quando esta deformação era menor, a marca de desgaste dos contra corpos se mostrava com geometria circular.



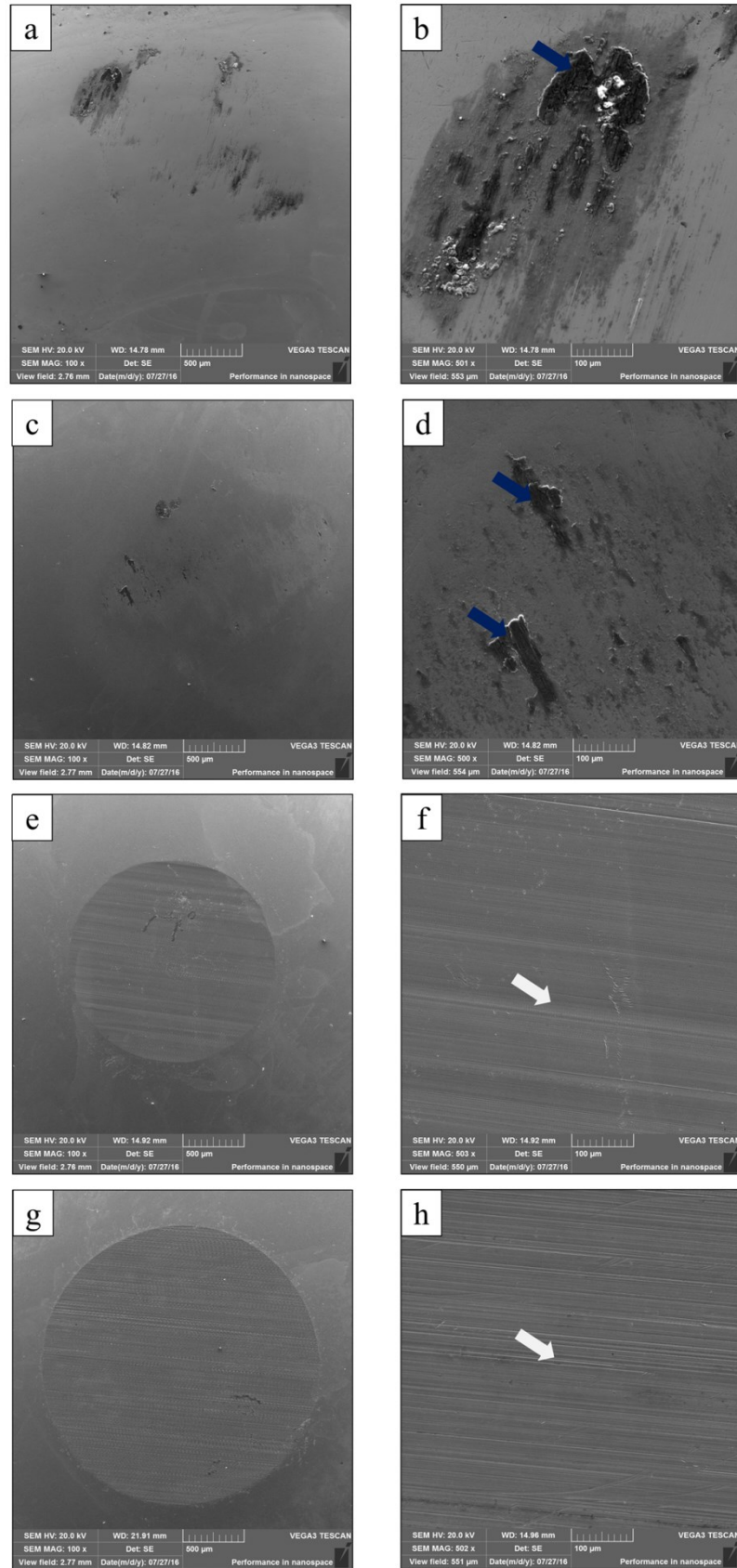


Figura 4.61: Imagens de MEV das marcas de desgaste dos construtores. (a) e (b) RAD; (c) e (d) 0,1 µm; (e) e (f) 1 µm; (g) e (h) 10 µm.

Todos os resultados mostrados evidenciaram o significativo efeito da adição das partículas de alumina, que promoveram uma forte diminuição no coeficiente de atrito e afetaram significativamente as taxas de desgaste das amostras de alumínio e os contra corpos de aço. Entretanto, quando as partículas adicionadas possuíam um diâmetro pequeno (0,1  $\mu\text{m}$ ), o efeito foi pequeno. A adição destas pequenas partículas na presença de água destilada pareceu contribuir de fato para intensificar a formação de uma tribocamada protetora altamente oxidada rica em alumínio e ferro na superfície das amostras, que contribuiu para uma ligeira diminuição no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste do sistema. Este resultado não é surpreendente e tem sido amplamente reportado na literatura, em particular no comportamento tribológico de aços na presença de óxidos de ferro adicionados previamente no contato (IWABUCHI; KUBOSAWA; HORI, 1990; KATO, 2003), embora os efeitos no atrito e no desgaste encontrados quando adicionadas as partículas menores de alumina, serem muito menores do que aqueles reportados na literatura para os aços (IWABUCHI; KUBOSAWA; HORI, 1990; KATO, 2003; BARRAU et al., 2007), polímeros (HARRIS et al., 2015) e cerâmicos (DENAPE; LAMON, 1990; CHERIF; GUEROULT; RIGAUD, 1997).

Contudo, a principal novidade do presente trabalho foi a grande transição no comportamento tribológico quando adicionadas as maiores partículas nos ensaios. Propõe-se que quando as partículas são menores, elas podem se encontrar alojadas ou transferidas para longe do contato pelos vales que compõem a topografia superficial das amostras e, portanto, sua participação nos fenômenos envolvidos na formação de uma tribocamada protetora é de pequena importância. A Figura 4.62 representa esquematicamente o mecanismo proposto. Este mecanismo torna-se mais provável e verdadeiro na presença de água, uma vez que os fluidos são frequentemente relatados na literatura (DENAPE; LAMON, 1990) como mecanismos de remoção de debris do contato após a sua formação, se tornando então, passivos ao invés de debris ativos. Por outro lado, quando as partículas são grandes, elas provavelmente no início encontram-se aderidas à superfície macia do alumínio, levando ao desgaste abrasivo dos contra corpos duros de aço. Isto resulta em um severo sulcamento da superfície dos contra corpos, levando a um aumento na taxa de desgaste. O efeito de sulcamento causado por debris maiores também mostrou causar efeito negativo no desgaste de materiais dúcteis (OKTAY; SUH, 1992). Depois disso, as partículas que foram inicialmente aderidas à superfície das amostras foram severamente fragmentadas, deformadas, misturadas com o material removido do contra corpo e altamente oxidadas e a sua subsequente compactação levou à formação de uma compacta, contínua e protetora tribocamada na superfície das amostras, como evidenciado pelas análises das marcas de

desgaste. Esta tribocamada protetora foi então a causa provável para os baixos coeficientes de atrito encontrados nas mesmas condições, que apresentaram uma redução do coeficiente de atrito com o aumento do número de ciclos (Figura 4.52).

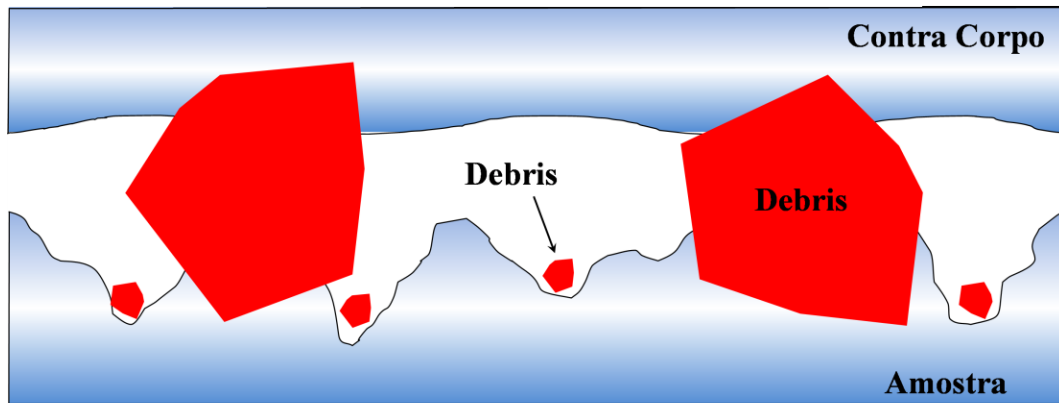


Figura 4.62: Esquema ilustrativo de um contato com debris.

A possibilidade de que a topografia superficial tenha um forte efeito sobre a forma como os debris participam do contato tribológico, afetando o atrito e o desgaste, tem sido abordado na literatura (FRIEDRICH; KARGER-KOCSIS; LU, 1991; ZUMGAHR; MATHIEU; BRYLKA, 2007; HARRIS et al., 2015). Por exemplo, para polímeros, a topografia do contra corpo foi variada de modo que pudesse reter ou remover os debris do contato e as condições em que a topografia removeu os debris do contato não resultaram na formação de uma tribocamada protetora (HARRIS et al., 2015).

Então se propõe um novo índice, chamado Tamanho Relativo (TR), definido como:

$$TR = \frac{D_d}{S_q} \quad (4.1)$$

Onde,  $D_d$  é o diâmetro médio dos debris (ou das partículas adicionadas ao contato, neste caso), e  $S_q$  é o valor RMS das alturas das asperidades da superfície. Então, sugere-se que quando o valor do tamanho relativo é menor que 1, os debris não possuem envolvimento no contato tribológico. Para verificar a validade deste índice é mostrado na Figura 4.63 um gráfico do Tamanho Relativo (TR), do coeficiente de atrito e das taxas de desgaste para os diferentes tamanhos de partículas adicionados. A taxa de desgaste apresentada no gráfico é a taxa de desgaste do sistema, ou a taxa de desgaste total, que é a soma das taxas de desgaste das amostras e dos contra corpos para cada condição. Nota-se claramente que para os ensaios com as partículas menores (0,05 e 0,1  $\mu\text{m}$ ), o índice TR é menor que 1 e então a participação das partículas no contato tribológico é muito pequena. Esses ensaios apresentaram uma leve

redução no coeficiente de atrito e praticamente nenhuma diferença na taxa de desgaste do sistema quando comparados com os ensaios RAD. Para as partículas maiores (1 e 10 $\mu\text{m}$ ), o valor do índice TR é maior que 3. Uma clara transição no comportamento foi observada, onde os coeficientes de atrito e as taxas de desgaste reduziram significativamente.

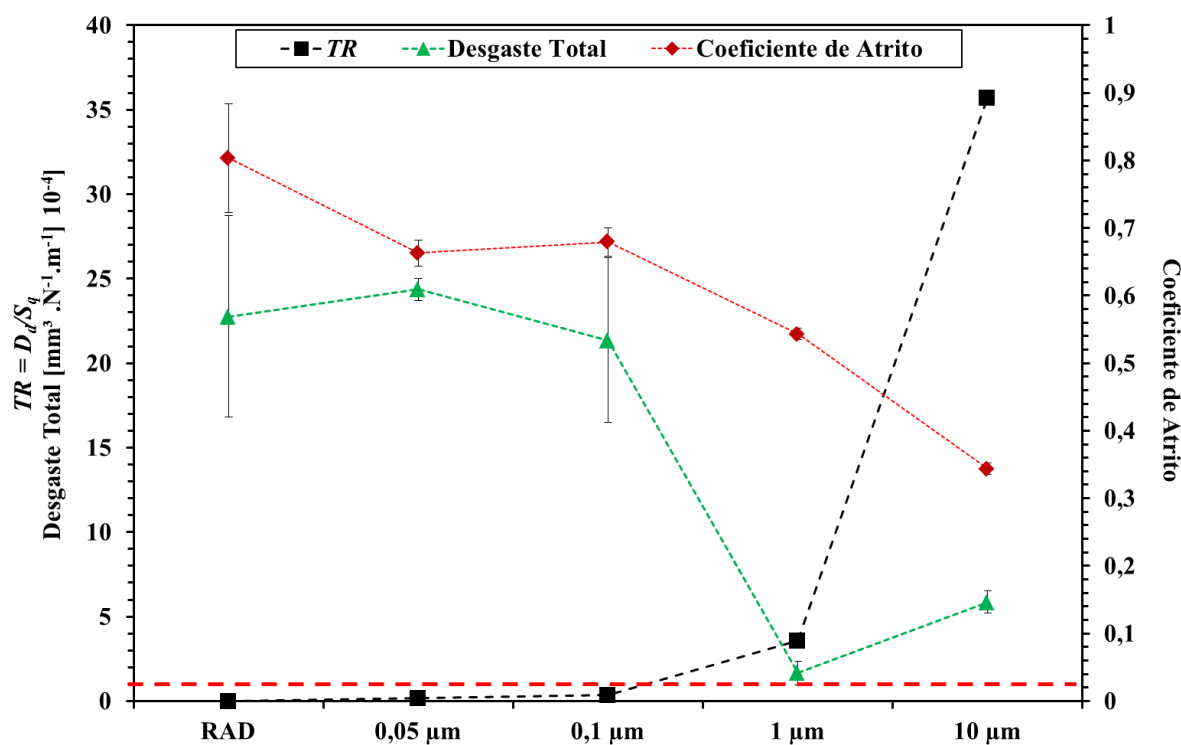


Figura 4.63: Relação entre o Índice de tamanho relativo ( $TR$ ), coeficiente de atrito e as taxas de desgaste dos materiais testados.

Estes resultados mostraram portanto, que os debris de fato participam do contato tribológico e afetam significativamente os eventos envolvidos na formação de tribocamadas protetoras, mas este efeito é fortemente dependente de como os debris interagem com a topografia das superfícies em contato. Quando o índice  $TR$  é menor que 1, os debris são particularmente passivos e participam pouco como partículas de terceiro corpo no contato, enquanto que para valores de  $TR$  maiores que 3 os debris possuem um papel muito ativo no contato, afetando significativamente o comportamento tribológico. É possível que, uma vez que o parâmetro  $S_q$  representa um valor médio das alturas das asperidades da superfície, para valores de  $TR$  entre 1 e 3, uma região de transição existe, onde os debris participam do contato mas não levando à um severo mecanismo de sulcamento do contra corpo, como uma analogia com a classificação das razões de  $\lambda$  (espessura do filme lubrificante /  $S_q$ ) usada para contatos tribológicos lubrificados (STRIBECK, 1902).

De fato, os debris têm uma participação significativa no contato, principalmente quando o índice TR é maior que 3. Sendo assim, procurou-se ainda investigar o efeito de uma maior quantidade de debris no contato, variando-se a concentração das partículas diluídas em água destilada, na intenção de entender como esta maior quantidade de debris poderia influenciar o comportamento tribológico.

Os ensaios foram efetuados nas mesmas condições e materiais, variando-se a concentração de partículas de alumina diluídas em água destilada com concentrações de 2%, 10% e 40%, na tentativa de entender como a quantidade de debris poderia influenciar, por exemplo, na formação de tribocamadas. Então foram utilizadas soluções com concentrações muito distintas a fim de promover tal variação da quantidade destas partículas adicionadas. Foram utilizadas partículas com tamanho de 10  $\mu\text{m}$ , estando em uma condição onde o índice TR é maior que 3 e também para efeito comparativo com os ensaios efetuados anteriormente. Os ensaios RAD (ensaios somente com água destilada) e 2% são os mesmos ensaios efetuados anteriormente.

A Figura 4.64 mostra a evolução do coeficiente de atrito para as condições testadas. Os mapas triboscópicos 3D são típicos para cada situação ensaiada. Observa-se que para todas as condições ensaiadas existe um transiente inicial, como observado e comentado anteriormente na Figura 4.51. Após este transiente inicial, o coeficiente de atrito aparece uniforme ao longo da posição sobre a amostra e também ao longo dos ciclos.

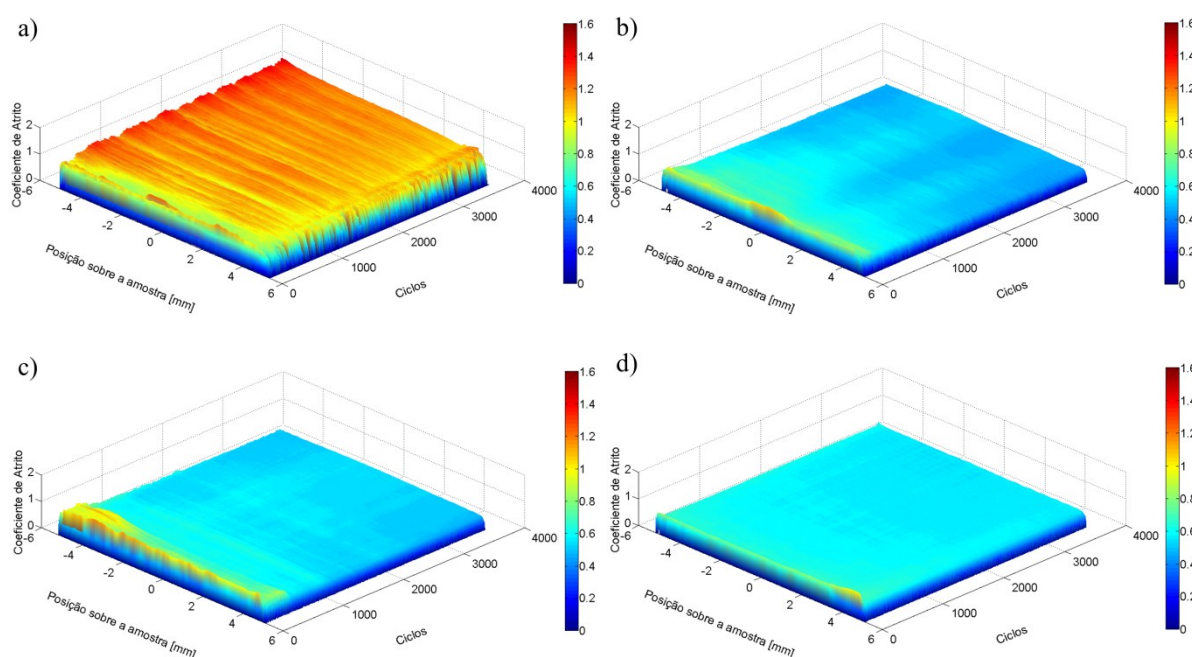


Figura 4.64: Evolução do coeficiente de atrito. (a) RAD, (b) 2%, (c) 10%, (d) 40%.

De fato, como ilustrado na Figura 4.65, o coeficiente de atrito em função do número de ciclos, mostra uma tendência crescente, quando aumentada a concentração de partículas no contato, mantendo a baixa variação do coeficiente de atrito ao longo dos ciclos.

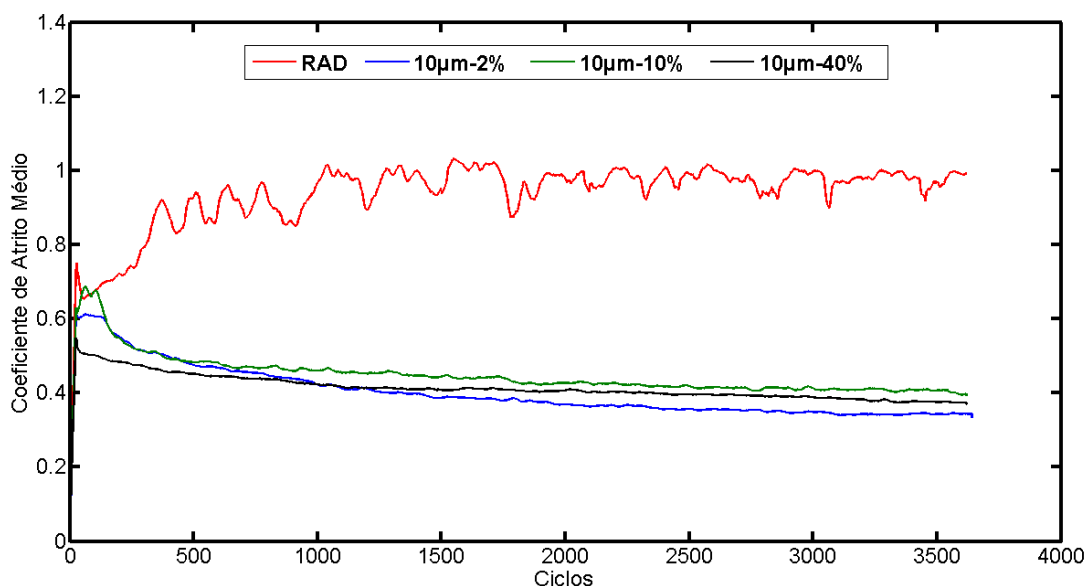


Figura 4.65: Evolução do coeficiente de atrito médio por ciclo.

Através do coeficiente de atrito médio no regime permanente, mostrado na Figura 4.66, foi possível observar um aumento em torno de 10%, quando aumentada a concentração das partículas no contato. Análises via ANOVA usando o software Statistica evidenciaram que as condições com 10 e 40% não apresentaram diferenças nos valores de coeficiente de atrito com 95% de confiabilidade.

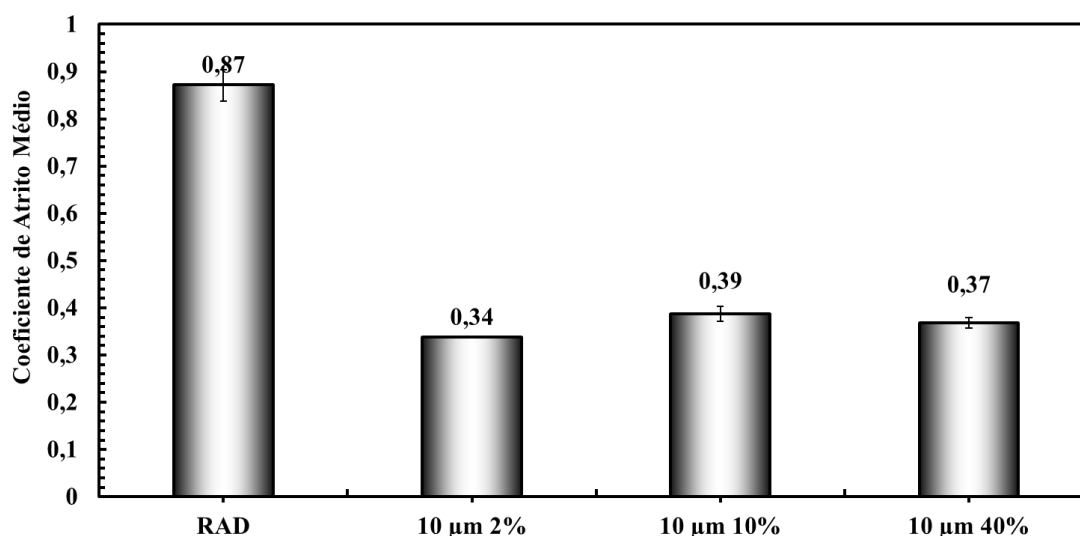


Figura 4.66: Coeficiente de atrito médio no regime permanente.



A Figura 4.67 exibe imagens típicas para as condições testadas geradas a partir de medições feitas em um perfilômetro 3D. Nota-se que o aspecto das marcas de desgaste apresentadas pelas condições com diferentes concentrações, foi semelhante quando comparado com os ensaios RAD. Adicionalmente percebe-se que para os ensaios com 2% a superfície desgastada apresenta-se mais uniforme, e que esta vai se tornando aparentemente mais irregular, com uma maior quantidade de picos elevados, quando aumentada a concentração de partículas adicionadas no contato. Entretanto há uma maior quantidade de picos espaçados para as condições com 10% e 40%, podendo indicar uma maior quantidade de partículas ancoradas na superfície das amostras.

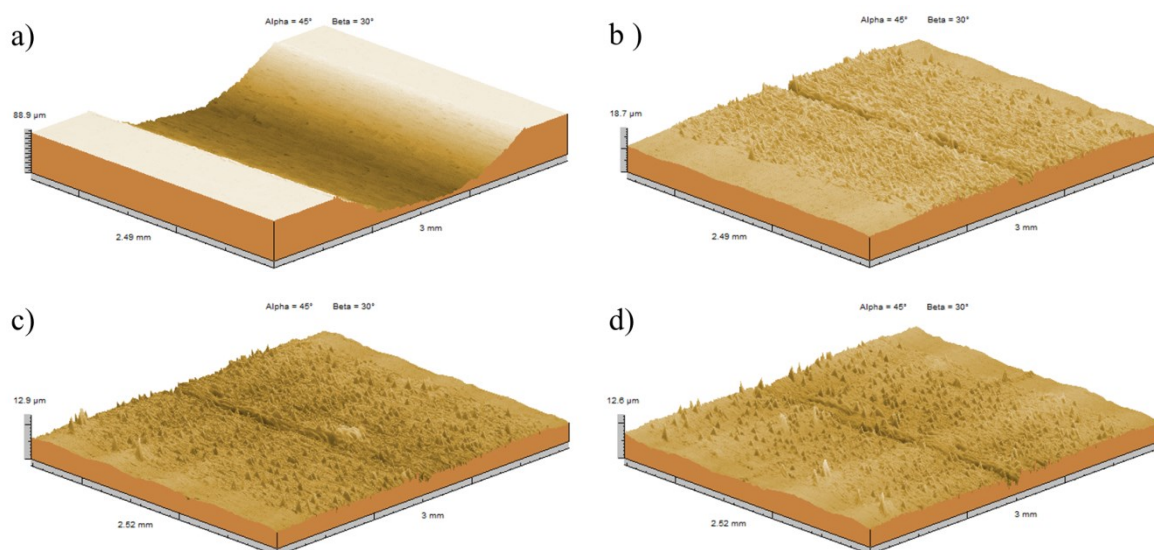


Figura 4.67: Imagens geradas via perfilometria 3D. (a) RAD. (b) 2%. (c) 10%. (d) 40%.

A Figura 4.68 mostra a taxa de desgaste do sistema. Os valores apresentados para as taxas de desgaste diferem dos evidenciados anteriormente para os ensaios com adição de alumina em solução a 2%, pois para estes ensaios foi utilizado outro equipamento de medição, como comentado no Capítulo 3 Metodologia.

As diferenças nas medições de topografia superficial entre as técnicas de Interferometria Laser e Perfilometria por Contato são mostradas na literatura (POON; BHUSHAN, 1995; SERUP; JEMEC; GROVE, 2006; VORBURGER et al., 2007; BHUSHAN, 2013). Perfilômetros mecânicos por contato tendem a se comportar como filtros mecânicos, além de ainda, poder causar danos às superfícies analisadas, devido ao contato entre a ponta e a superfície, podendo levar a distorções nos perfis medidos. Além disso, por razões de resistência mecânica, geralmente as pontas de diamante dos apalpadores por contato possuem raios de ponta na ordem de 1 a 2,5  $\mu\text{m}$ , o que os impedem de chegar à vales muito estreitos e

profundos (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Os perfilômetros ópticos possuem tipicamente um diâmetro de feixe na ordem de 1  $\mu\text{m}$ , fazendo com que, por exemplo, parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  medidos por estes sistemas de medição se tornem maiores (cerca de 1 ordem de grandeza), quando comparados com os apalpadores por contato, devido à maior capacidade de alcançar vales mais estreitos e profundos (SERUP; JEMEC; GROVE, 2006). Portanto, as diferenças de medições encontradas neste trabalho podem ser explicadas pelas diferenças dos equipamentos e das técnicas de medição. Sendo assim, todas as amostras ensaiadas com adição de alumina com 10 $\mu\text{m}$  a 2% e também os ensaios RAD foram medidos novamente para poderem ser comparados com os resultados dos ensaios com 10 e 40%.

O aumento da concentração das partículas adicionadas contribuiu para uma diminuição no ganho de massa nas amostras, visto que o ganho de massa apresentado pelas condições com 10% e 40% foi menor que o apresentado pelos ensaios com 2%. A maior concentração da solução de partículas (40%), foi a que apresentou a maior taxa de desgaste dos contra corpos em torno de 20% maior que a solução 2%, e 1 ordem de grandeza maior que para os ensaios RAD.

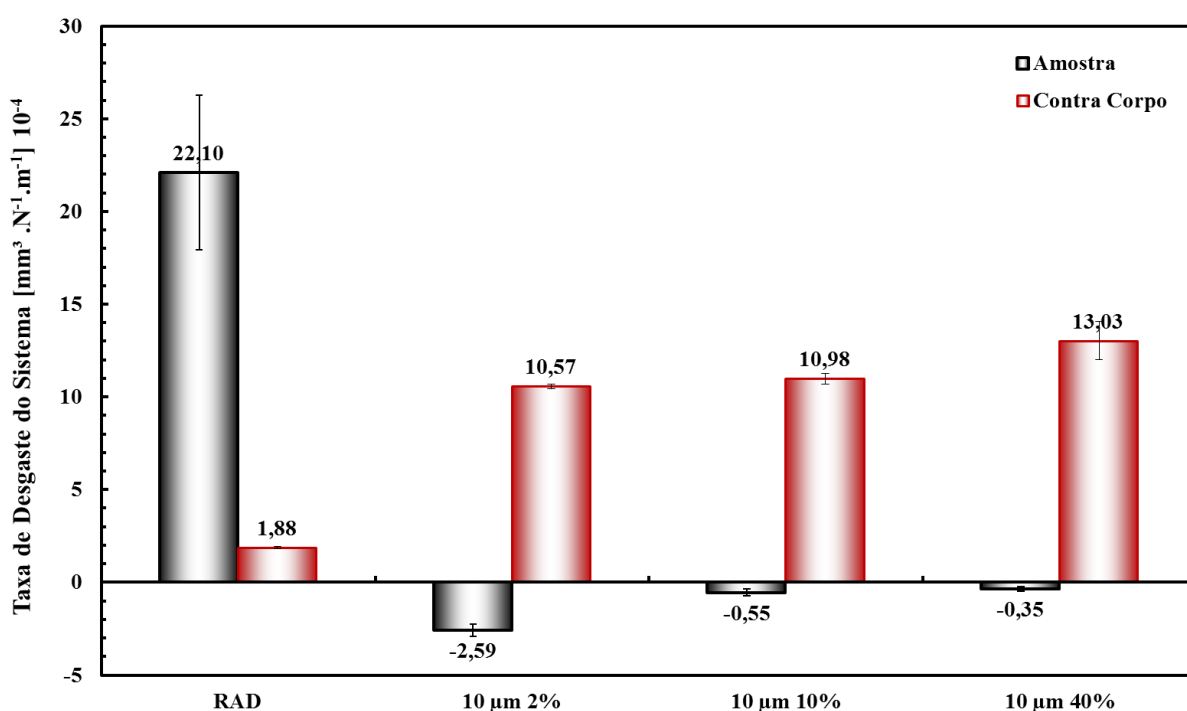


Figura 4.68: Taxa de Desgaste do Sistema.

A Figura 4.69 exibe um comparativo entre as marcas de desgaste das amostras. Como apresentado anteriormente para os ensaios com 2% (Figura 4.60), as tribocamadas formadas para as outras condições (10 e 40%) são semelhantes entre si e também com as formadas nos



ensaios com 2% em solução, apresentando ainda uma maior quantidade de partículas isoladas que ficaram presentes na tribocamada e que não sofreram fragmentação, deformação e/ou aglomeração, sendo estas em maior quantidade para os ensaios com 40%. Esta maior presença de partículas (ancoradas/presas na tribocamada), pode ser a razão do maior coeficiente de atrito, pois o gasto energético seria maior para a movimentação delas no contato (SHEASBY; VANDERGEEST, 1981; USMANI; SAMPATH, 1999). Adicionalmente, a maior quantidade de partículas isoladas na tribocamada sugere que houve uma menor fragmentação, deformação e/ou aglomeração no contato, podendo explicar o menor ganho de massa apresentado pelas condições com 10% e 40%.

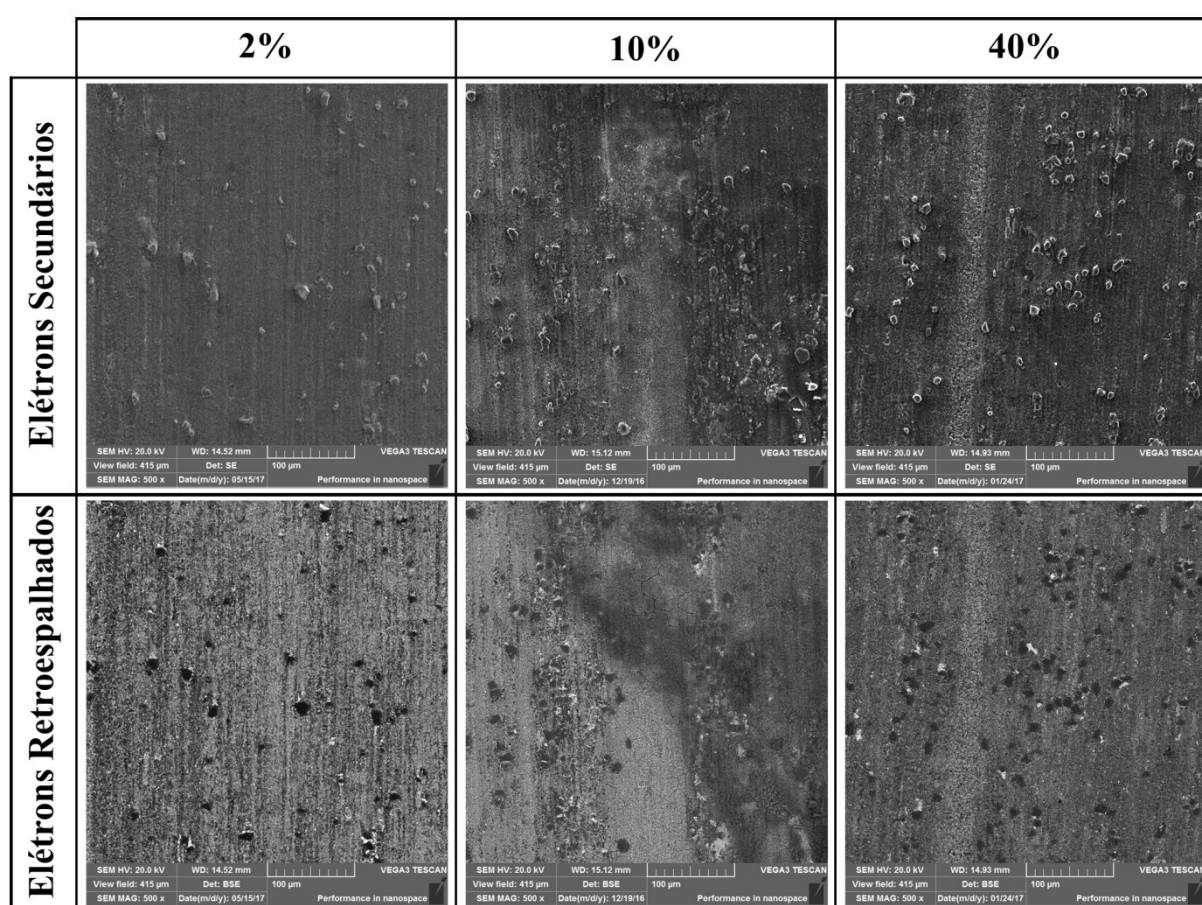


Figura 4.69: Comparativo dos mecanismos de desgaste para as diferentes concentrações.

A Figura 4.70-a revela uma análise com mais detalhes das tribocamadas típicas formadas para as condições com 10 e 40%, onde nota-se claramente uma grande quantidade de debris na tribocamada (indicados pelas setas brancas e analisados via EDS – área 2 da Figura 4.70-b, espectro EDS Figura 4.70-c), onde a presença dessas poderiam ser pontos de ancoramento para a formação das tribocamadas. Análises via EDS das tribocamadas (área 1 - Figura 4.70-d) mostram que elas são compostas de alumínio, oxigênio, ferro e cromo, sendo

estes dois últimos, materiais oriundos dos contra corpos que foram transferidos durante o deslizamento para as amostras e participaram na formação das tribocamadas.

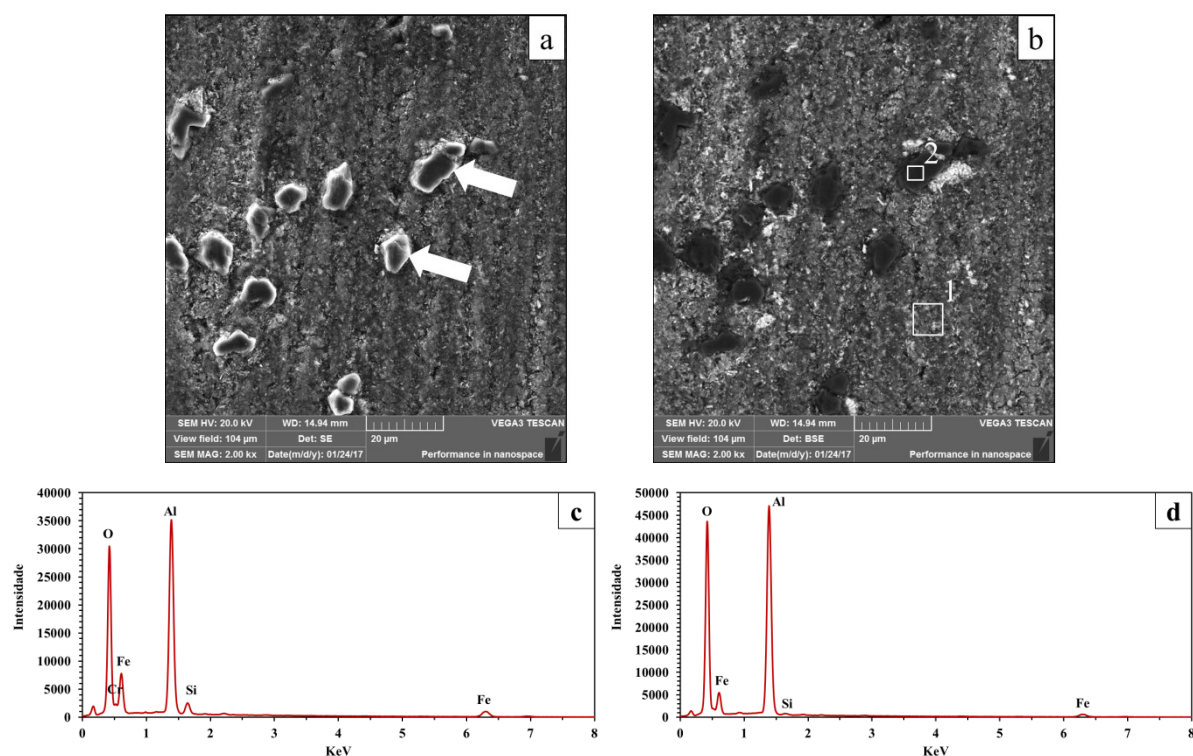


Figura 4.70: Detalhe da tribocamada formada nos ensaios com 40%. (a) Imagem de MEV por elétrons Secundários (b) Imagem de MEV por elétrons retroespalhados, (c) Espectro EDS para a área 1, (d) Espectro EDS para a área 2.

A Figura 4.71 revela as marcas de desgaste dos contra corpos, onde percebe-se que as marcas de desgaste das condições com 10 e 40% (Figura 4.71-b e Figura 4.71-c) exibiram marcas de abrasão, como mostrado também para 2%, Figura 4.71-a, e ainda apresentaram marcas de desgaste maiores para os ensaios com solução 40% em peso de alumina. Como comentado anteriormente, os debris maiores e duros, incorporados à tribocamada formada nas amostras, poderiam agir como protuberâncias, levando ao desgaste abrasivo nos contra corpos, aumentando a taxa de desgaste, como reportado também por (VIÁFARA; SINATORA, 2011).

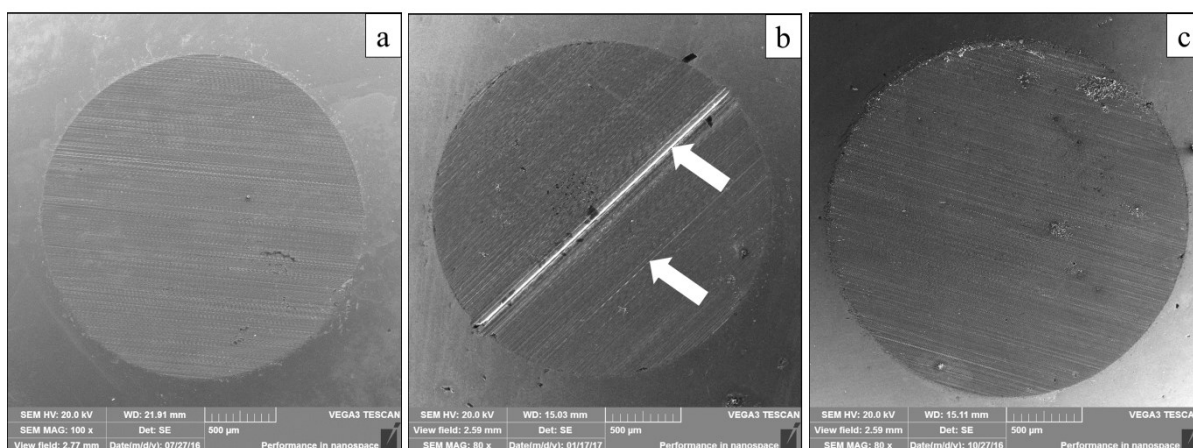


Figura 4.71: Imagens de MEV das marcas de desgaste dos contra corpos. (a) 2%; (b) 10%; (c) 40%.

Apesar dos ensaios com adição de partículas com 40% apresentarem marcas de desgaste maiores, as marcas de abrasão (setas brancas) se mostraram com intensidade similar para todos os ensaios com adição de partículas como retratado pela Figura 4.72.

Portanto, a maior concentração de partículas adicionadas ao contato (40%), propiciou uma maior quantidade de debris ancorados na superfície das amostras, levando também a um aumento do coeficiente de atrito em torno de 10%. Em relação à taxa de desgaste, quando comparado com os ensaios com adição de 2%, o aumento da concentração de debris propiciou uma redução no ganho de massa das amostras (em torno de 7 vezes, como mostrado na Figura 4.68), seguido de um aumento em torno de 20% na taxa de desgaste dos contra corpos.

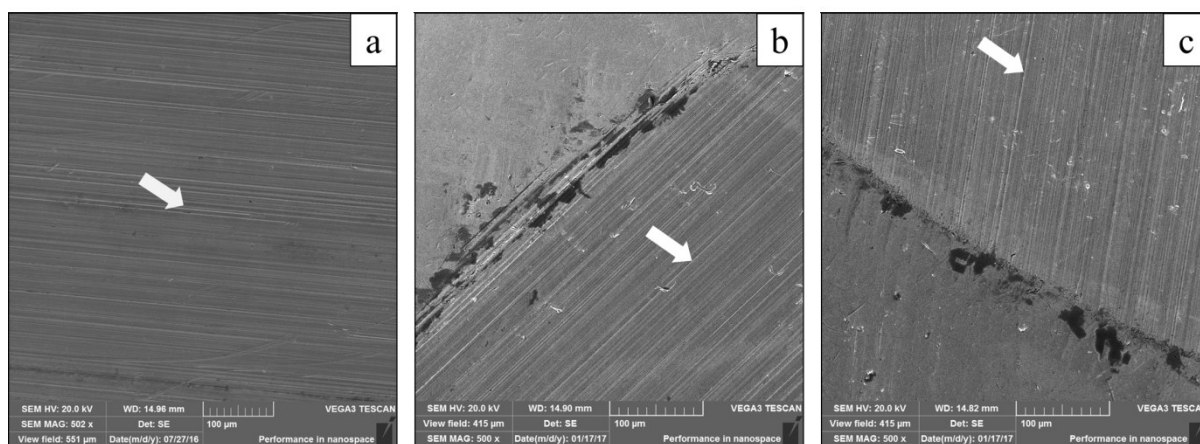


Figura 4.72: Detalhe das marcas de desgaste dos contra corpos. (a) 2%; (b) 10%; (c) 40%.

## CAPÍTULO V

### Conclusões

A presença de debris no contato claramente influencia no comportamento tribológico, pois quando removidos os debris houve uma tendência na manutenção do atrito e no aumento do desgaste, porém, quando adicionadas partículas para simular os debris no contato, estas contribuíram na manutenção em alguns casos e principalmente na redução do atrito e desgaste dos sistemas tribológicos testados.

Os pré-testes realizados com remoção de debris, feitos antes da instalação do sistema de tratamento de ar comprimido, apresentaram reduções significativas no coeficiente de atrito (4 vezes) e no desgaste (44 vezes). Análises via MEV-EDS mostraram que este sistema estaria contaminado com óleo lubrificante, proveniente da linha de ar comprimido. A remoção de debris, já com o sistema de secagem e filtração de ar, apresentou resultados completamente diferentes dos anteriores, resultando em um aumento significativo na taxa de desgaste (cerca de 1 ordem de grandeza) e pouco efeito sobre o coeficiente de atrito.

A adição de partículas de óxidos de ferro promoveu uma redução no coeficiente de atrito em 15% e também no desgaste em 95% quando adicionados as partículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (maiores e menos duras), sugerindo que existe então uma influência da adição de partículas no comportamento tribológico, e ainda que o tamanho, e principalmente, a dureza relativa deles em relação aos corpos em contato, foi o fator determinante na redução do atrito e desgaste.

A adição de partículas de alumina em excesso apresentou comportamentos diferentes. Os ensaios com adição de partículas menores ( $0,05\ \mu\text{m}$ ) apresentaram uma taxa de desgaste maior tanto para as amostras quanto para os contra corpos. Já quando adicionadas as maiores partículas ( $10\ \mu\text{m}$ ), este aumento no desgaste não ocorreu. Adicionalmente as tribocamadas nos ensaios com adição das maiores partículas formaram-se mais espalhadas por toda a marca de desgaste das amostras. Ambas as condições apresentaram aumentos no coeficiente de atrito.

A adição controlada de partículas de alumina contribuiu para a formação de tribocamadas ao longo da marca de desgaste das amostras e também dos contra corpos. Esta adição de partículas não promoveu variação significativa no coeficiente de atrito, nem na taxa de desgaste das amostras, mas para os contra corpos, os ensaios com adição das maiores partículas promoveram a menor taxa de desgaste, sendo cerca de 30% menor que para os ensaios com adição das menores partículas de alumina.

A adição de partículas de alumina dispersas em água destilada contribuiu para uma queda significativa no coeficiente de atrito de acordo com o aumento do tamanho das partículas adicionadas, com o menor coeficiente de atrito apresentado quando adicionadas as maiores partículas ao contato ( $\phi=10\text{ }\mu\text{m}$ ). As maiores partículas adicionadas intensificaram significativamente a formação de tribocamadas na superfície das amostras, resultando em um ganho de massa. Para os contra corpos, a adição das maiores partículas promoveu um aumento na taxa de desgaste e, também o aparecimento de marcas de abrasão, sugerindo que a tribocamada formada na superfície das amostras agiu como protuberâncias duras, levando ao desgaste abrasivo dos contra corpos.

Foi proposto um novo índice, chamado Tamanho Relativo (TR), comparando os tamanhos dos debrís e a topografia dos corpos em contato. Para valores de TR menores que 1, os debrís eram muito pequenos para se envolverem no contato tribológico, não afetando o atrito e o desgaste. Para maiores valores de TR, os debrís participariam ativamente no contato atuando na formação de tribocamadas protetoras, reduzindo o atrito e o desgaste do sistema.

A concentração de partículas adicionadas ao contato também foi estudada, sendo que a maior concentração (40%) propiciou uma maior quantidade de debrís ancorados na superfície das amostras, levando também a um aumento do coeficiente de atrito em torno de 10%. Em relação à taxa de desgaste, quando comparado com os ensaios com adição de 2%, o aumento da concentração de debrís propiciou uma redução no ganho de massa das amostras (em torno de 7 vezes), seguido de um aumento em torno de 20% na taxa de desgaste dos contra corpos.

## **CAPÍTULO VI**

### **Trabalhos Futuros**

Sugere-se como trabalhos futuros o estudo de:

- Um estudo mais aprofundado da relação dos debris com a formação e destacamento das tribocamadas, como por exemplo, através de análises das seções transversais das marcas de desgaste, através de MEV-FIB.
- A influência da presença dos debris interagindo com lubrificantes líquidos;
- O efeito conjunto entre partículas de lubrificantes sólidos e debris, na formação de tribocamadas, procurando entender a dinâmica das partículas de lubrificantes sólidos atuando juntamente com os debris;
- A influência da presença dos debris em materiais diferentes como cerâmicos e polímeros;
- Adicionalmente a interação dos debris com superfícies texturizadas, poderia também ser estudada.

## CAPÍTULO VII

### Referências Bibliográficas

- BARRAU, O.; BOHER, C.; GRAS, R.; REZAI-ARIA, F. Wear mechanisms and wear rate in a high temperature dry friction of AISI H11 tool steel: Influence of debris circulation. **Wear**, v. 263, n. 1–6, p. 160-168, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.032>
- BELIN, M. Triboscopy: A new quantitative tool for microtribology. **Wear**, v. 168, n. 1–2, p. 7-12, 1993. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90190-W](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(93)90190-W)
- 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. [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)90070-1](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(94)90070-1)
- BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. Wiley, 2013. ISBN 9781118403228.
- BLAU, P. J. Mechanisms for transitional friction and wear behavior of sliding metals. **Wear**, v. 72, n. 1, p. 55-66, 1981. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90283-0](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(81)90283-0)
- BOZZI, A. C. **Obtenção e comportamento tribológico do ferro sinterizado e do ferro sinterizado oxidado a vapor em ensaios de desgaste por deslizamento**. 2004. 206 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- BOZZI, A. C.; DE MELLO, J. D. B. Wear resistance and wear mechanisms of WC–12%Co thermal sprayed coatings in three-body abrasion. **Wear**, v. 233-235, n. Supplement C, p. 575-587, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00206-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00206-9)
- BOZZI, A. C.; DE MELLO, J. D. B. **Triboscopia: Princípios potencialidades da técnica e aplicação em ensaios de desgaste por deslizamento**. 61º Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro - RJ: Anais do 61º Congresso Anual da ABM: 4010-4018 p. 2006.
- BUCKLEY, D. H. **Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication**. Elsevier Scientific Publishing Company, 1981. ISBN 9780444416773.
- CAO, S.; SARASIN, F.; CANTONI, M.; MISCHLER, S. Effect of surface films on tribologically induced metallurgical transformations of steel in oil lubricated contacts. **Wear**, v. 368–369, p. 75-83, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.09.011>
- CHEN, L. H. Deformation, transfer and debris formation during sliding wear of metals. **Scripta Metallurgica et Materialia**, v. 24, n. 5, p. 827-832, 1990. [http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X\(90\)90120-6](http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X(90)90120-6)
- CHERIF, K.; GUEROULT, B.; RIGAUD, M. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZrO<sub>2</sub> debris life cycle during wear: effects of the third body on wear and friction. **Wear**, v. 208, n. 1–2, p. 161-168, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07455-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07455-8)

- COCKS, M. Wear Debris in the Contact between Sliding Metals. **Journal of Applied Physics**, v. 29, n. 11, p. 1609-1610, 1958. doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.1723007>
- COMMITTEE, A. I. H. **Properties and Selection-- Irons, Steels, and High-performance Alloys**. ASM International, 1990. ISBN 9780871703774.
- DA SILVA, W. M.; BINDER, R.; DE MELLO, J. D. B. Abrasive wear of steam-treated sintered iron. **Wear**, v. 258, n. 1-4, p. 166-177, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.042>
- DE MELLO, J. D. B.; BINDER, R. A methodology to determine surface durability in multifunctional coatings applied to soft substrates. **Tribology International**, v. 39, n. 8, p. 769-773, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.015>
- DE MELLO, J. D. B.; GONÇALVES JR, J. L.; COSTA, H. L. Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls. **Wear**, v. 302, n. 1-2, p. 1295-1309, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.006>
- DENAPE, J.; LAMON, J. Sliding friction of ceramics - mechanical action of the wear debris. **Journal of Materials Science**, v. 25, n. 8, p. 3592-3604, 1990. 10.1007/bf00575394
- DONG, W. P.; MAINSAIL, E.; STOUT, K. J. Reference Planes for the Assessment of Surface Roughness in Three Dimensions. **International Journal of Machine Tools as Manufacture**, v. 35, n. 2, p. 263-271, 1995.
- DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography I: Some inherent properties of parameter variation. **Wear**, v. 159, n. 2, p. 161-171, 1992. 10.1016/0043-1648(92)90299-n
- \_\_\_\_\_. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography II: Statistical properties of parameter variation. **Wear**, v. 167, n. 1, p. 9-21, 1993. 10.1016/0043-1648(93)90050-v
- \_\_\_\_\_. Comprehensive study of parameters for characterising three- dimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties. **Wear**, v. 178, n. 1-2, p. 29-43, 1994. 10.1016/0043-1648(94)90127-9
- DOS SANTOS, M. B.; COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Potentiality of triboscopy to monitor friction and wear. **Wear**, v. 332-333, p. 1134-1144, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.10.017>
- DWIVEDI, D. K. Wear behaviour of cast hypereutectic aluminium silicon alloys. **Materials & Design**, v. 27, n. 7, p. 610-616, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2004.11.029>
- FISCHER, T. E.; ZHU, Z.; KIM, H.; SHIN, D. S. Genesis and role of wear debris in sliding wear of ceramics. **Wear**, v. 245, n. 1-2, p. 53-60, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00465-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00465-8)
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2004.07.002>
- FORBES, E. S. Antiwear and extreme pressure additives for lubricants. **Tribology**, v. 3, n. 3, p. 145-152, 1970. [http://dx.doi.org/10.1016/0041-2678\(70\)90111-9](http://dx.doi.org/10.1016/0041-2678(70)90111-9)
- FRANCO, L. A.; SINATORA, A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp. **Precision Engineering**, v. 40, n. Supplement C, p. 106-111, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.10.011>



- FRIEDRICH, K.; KARGER-KOCSIS, J.; LU, Z. Effects of steel counterface roughness and temperature on the friction and wear of PE(E)K composites under dry sliding conditions. **Wear**, v. 148, n. 2, p. 235-247, 1991. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90287-5](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(91)90287-5)
- FU, T.; ZHOU, Z. F.; ZHOU, Y. M.; ZHU, X. D.; ZENG, Q. F.; WANG, C. P.; LI, K. Y.; LU, J. Mechanical properties of DLC coating sputter deposited on surface nanocrystallized 304 stainless steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 207, n. Supplement C, p. 555-564, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.07.076>
- HALLIDAY, J. S.; HIRST, W. The Fretting Corrosion of Mild Steel. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 236, n. 1206, p. 411-425, 1956. 10.1098/rspa.1956.0145
- HAMILTON, R. W.; SAYLES, R. S.; IOANNIDES, E. Wear due to debris particles in rolling bearing contacts. In: (Ed.). **Proceedings of the 24th Leeds-Lyon Symposium on Tribology**: Elsevier Tribology and Interface Engineering Series, v. Volume 34, 1998. p.87-93.
- HARRIS, K. L.; CURRY, J. F.; PITENIS, A. A.; ROWE, K. G.; SIDEBOTTOM, M. A.; SAWYER, W. G.; KRICK, B. A. Wear Debris Mobility, Aligned Surface Roughness, and the Low Wear Behavior of Filled Polytetrafluoroethylene. **Tribology Letters**, v. 60, n. 1, p. 1-8, 2015. 10.1007/s11249-015-0581-7
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Elsevier Science, 2017. ISBN 9780081009512.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Edward Arnold, 1992. ISBN 9780340561843.
- ISO 4287. **Surface Texture: Profile Method – Terms, Definitions and Surface Texture Parameters**. Geometrical Product Specifications (GPS) International Standard ISO 4287 1997.
- ISO 25178-2. **Surface texture: Areal -- Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters**. Geometrical product specifications (GPS). International Standard ISO 4287 2012.
- IWABUCHI, A.; HORI, K.; KUBOSAWA, H. The effect of oxide particles supplied at the interface before sliding on the severe-mild wear transition. **Wear**, v. 128, n. 2, p. 123-137, 1988. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90179-2](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(88)90179-2)
- IWABUCHI, A.; KUBOSAWA, H.; HORI, K. The dependence of the transition from severe to mild wear on load and surface roughness when the oxide particles are supplied before sliding. **Wear**, v. 139, n. 2, p. 319-333, 1990. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90054-E](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(90)90054-E)
- J.F. MOULDER; W.F. STICKLE; P.W. SOBOL; BOMBEN, K. D. **Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy**. **Physical Electronics**. Eden Prairie, Minnesota, USA: Perkin-Elmer, 1992.
- JIANG, J.; STOTT, F. H.; STACK, M. M. The role of triboparticulates in dry sliding wear. **Tribology International**, v. 31, n. 5, p. 245-256, 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00027-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00027-9)
- KATO, H. Severe-mild wear transition by supply of oxide particles on sliding surface. **Wear**, v. 255, n. 1-6, p. 426-429, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00077-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00077-2)

- KATO, H.; EYRE, T. S.; RALPH, B. Wear mechanism map of nitrided steel. **Acta Metallurgica et Materialia**, v. 42, n. 5, p. 1703-1713, 1994. [http://dx.doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90380-8](http://dx.doi.org/10.1016/0956-7151(94)90380-8)
- KATO, K.; ADACHI, K. Wear Mechanisms. In: BHUSHAN, B. (Ed.). **Modern Tribology Handbook**: CRC Press, v.II, 2001. p.273-300.
- KIM, H. J.; KARTHIKEYAN, S.; RIGNEY, D. The structure and composition of aluminum wear debris generated by unlubricated sliding in different environments. **Wear**, v. 263, n. 1, p. 849-857, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.016>
- KIM, H. J.; WINDL, W.; RIGNEY, D. Structure and chemical analysis of aluminum wear debris: Experiments and ab initio simulations. **Acta Materialia**, v. 55, n. 19, p. 6489-6498, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2007.08.013>
- KUBASCHEWSKI, O.; HOPKINS, B. E. **Oxidation of metals and alloys**. Academic Press, 1953.
- LABIAPARI, W. S.; DE ALCÂNTARA, C. M.; COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Wear debris generation during cold rolling of stainless steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 223, p. 164-170, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.050>
- LEHEUP, E. R.; PENDLEBURY, R. E. Unlubricated reciprocating wear of stainless steel with an interfacial air flow. **Wear**, v. 142, n. 2, p. 351-372, 1991. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90174-S](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(91)90174-S)
- LIAN, Y.; YU, L.; XUE, Q. The antiwear and extreme pressure properties of some oil-water double soluble rare earth complexes Part 2: their tribological behaviours in liquid paraffin. **Wear**, v. 196, n. 1, p. 193-196, 1996. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06913-5](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(95)06913-5)
- LINGARD, S.; FU, K. H.; CHEUNG, K. H. Some observations on the wear of aluminium rubbing on steel. **Wear**, v. 96, n. 1, p. 75-84, 1984. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90105-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90105-4)
- MANISCALCO, S.; CALIGARI CONTI, M.; CASSAR, J.; GRIMA, C.; KARL, A.; SCHEMBRI WISMAYER, P.; MALLIA, B.; BUHAGIAR, J. Low temperature carburised austenitic stainless steel for metal-on-metal tribological contact. **Thin Solid Films**, v. 620, n. Supplement C, p. 103-113, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.07.084>
- MAYVILLE, R. A. Abrasive concentration effects on wear under reciprocating conditions. **Wear**, v. 140, n. 2, p. 359-367, 1990. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90095-R](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(90)90095-R)
- MEHAN, R. L. The wear of selected materials in mineral oil containing a solid contaminant. **Wear**, v. 124, n. 1, p. 65-85, 1988. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90235-9](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(88)90235-9)
- MEHAN, R. L.; FLYNN, P. L.; GIAMMARISE, A. W. Evaluation of piston ring materials in oil containing an abrasive using a ring-on-block test machine. **Wear**, v. 147, n. 1, p. 41-57, 1991. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90117-D](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(91)90117-D)
- 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. [10.1016/j.wear.2005.02.050](http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.050)
- MITCHELL, D. J.; MECHOLSKY JR, J. J.; ADAIR, J. H. All-steel and Si3N4-steel hybrid rolling contact fatigue under contaminated conditions. **Wear**, v. 239, n. 2, p. 176-188, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00369-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00369-5)

MOERMAN, F.; DEWULF, S. Hygiene control in the application of compressed air and food gases. In: (Ed.). **Hygiene in Food Processing (Second edition)**: Woodhead Publishing, 2014. p.203-255.

ODI-OWEI, S.; ROYLANCE, B. J. The effect of solid contamination on the wear and critical failure load in a sliding lubricated contact. **Wear**, v. 112, n. 3–4, p. 239-255, 1986. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(86\)90173-0](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(86)90173-0)

OKTAY, S. T.; SUH, N. P. Wear debris formation and agglomeration. **Journal of Tribology-Transactions of the Asme**, v. 114, n. 2, p. 379-393, 1992. 10.1115/1.2920897

OLIVEIRA JR, M. M. **Lubrificação Sólida em Meio Fluido**. 2013. 80 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

OLIVEIRA JR, M. M.; HAMMES, G.; BINDER, C.; KLEIN, A. N.; DE MELLO, J. D. B. **Solid lubrication in fluid film lubrication**. Lubrication Science. 2017. (In press.)

PAPAY, A. G. Antiwear and extreme-pressure additives in lubricants. **Lubrication Science**, v. 10, n. 3, p. 209-224, 1998. 10.1002/lis.3010100304

PENG, Z.; KESSISSOGLU, N. J.; COX, M. A study of the effect of contaminant particles in lubricants using wear debris and vibration condition monitoring techniques. **Wear**, v. 258, n. 11–12, p. 1651-1662, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.020>

PIEKOSZEWSKI, W.; SZCZEREK, M.; TUSZYNSKI, W. The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester. **Wear**, v. 249, n. 3–4, p. 188-193, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00555-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00555-5)

POON, C. Y.; BHUSHAN, B. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler. **Wear**, v. 190, n. 1, p. 76-88, 1995. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06697-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06697-7)

RODRIGUES, A. C. P.; YONAMINE, T.; ALBERTIN, E.; SINATORA, A.; AZEVEDO, C. R. F. Effect of Cu particles as an interfacial media addition on the friction coefficient and interface microstructure during (steel/steel) pin on disc tribotest. **Wear**, v. 330, n. Supplement C, p. 70-78, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.006>

RODRIGUES, A. C. P.; YONAMINE, T.; SINATORA, A.; AZEVEDO, C. R. F. Pin-on-disc tribotests with the addition of Cu particles as an interfacial media: Characterization of disc tribosurfaces using SEM-FIB techniques. **Tribology International**, v. 100, n. Supplement C, p. 351-359, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.034>

RONEN, A.; MALKIN, S. Wear mechanisms of statically loaded hydrodynamic bearings by contaminant abrasive particles. **Wear**, v. 68, n. 3, p. 371-389, 1981. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90183-6](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(81)90183-6)

SALVARO, D. B.; SILVÉRIO, M.; BINDER, C.; GIACOMELLI, R. O.; KLEIN, A. N.; DE MELLO, J. D. B. Genesis and stability of tribolayers in solid lubrication: case of pair DLC-stainless steel. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 5, n. 2, p. 136-143, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.10.008>

SANTANAM, N. Effect of wear debris on wear in rolling-sliding motion. **Wear**, v. 90, n. 2, p. 261-267, 1983. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(83\)90183-7](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(83)90183-7)

SENKEVICH, J. J.; JONES, D. A.; CHATTERJEE, I. Measuring the growth of oxide films on low carbon steel at 500°C by impedance spectroscopy. **Corrosion Science**, v. 42, n. 2, p. 201-210, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00079-7)

- SEP, J.; KUCABA-PIETAL, A. Experimental testing of journal bearings with two-component surface layer in the presence of an oil abrasive contaminant. **Wear**, v. 249, n. 12, p. 1090-1095, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00848-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00848-1)
- SERUP, J.; JEMEC, G. B. E.; GROVE, G. L. **Handbook of Non-Invasive Methods and the Skin, Second Edition**. Taylor & Francis, 2006. ISBN 9780849314377.
- SHARMA, V.; ERDEMIR, A.; ASWATH, P. B. An analytical study of tribofilms generated by the interaction of ashless antiwear additives with ZDDP using XANES and nano-indentation. **Tribology International**, v. 82, Part A, p. 43-57, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2014.09.019>
- SHEASBY, J. S.; VANDERGEEST, J. H. Debris control in dry wear testing. **Wear**, v. 73, n. 2, p. 283-294, 1981. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90296-9](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(81)90296-9)
- SHERINGTON, I.; HAYHURST, P. Simultaneous observation of the evolution of debris density and friction coefficient in dry sliding steel contacts. **Wear**, v. 249, n. 3-4, p. 182-187, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00572-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00572-5)
- SHERWOOD, P. M. A. Introduction to Studies of Aluminum and its Compounds by XPS. **Surface Science Spectra**, v. 5, n. 1, p. 1-3, 1998.
- SHI, Y.; PAN, F.; LONG, S.; WANG, W.; ZHU, G. Structure and tribological property of MoS<sub>x</sub>-CrTiAlN film by unbalanced magnetron sputtering. **Vacuum**, v. 86, n. 2, p. 171-177, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.05.010>
- SO, H. The mechanism of oxidational wear. **Wear**, v. 184, n. 2, p. 161-167, 1995. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)06569-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)06569-1)
- STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 9780750678360.
- STOTT, F. H.; WOOD, G. C. The influence of oxides on the friction and wear of alloys. **Tribology International**, v. 11, n. 4, p. 211-218, 1978. [http://dx.doi.org/10.1016/0301-679X\(78\)90178-0](http://dx.doi.org/10.1016/0301-679X(78)90178-0)
- STRAFFELINI, G.; TRABUCCO, D.; MOLINARI, A. Oxidative wear of heat-treated steels. **Wear**, v. 250, n. 1, p. 485-491, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00661-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00661-5)
- STRIBECK, R. Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. **Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure**, v. 36, n. 46, p. 1341-1348, 1902.
- SUH, N. P.; SIN, H. C. The genesis of friction. **Wear**, v. 69, n. 1, p. 91-114, 1981. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90315-X](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(81)90315-X)
- SULLIVAN, J. L.; HODGSON, S. G. A study of mild oxidational wear for conditions of low load and speed. **Wear**, v. 121, n. 1, p. 95-106, 1988. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90033-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90033-6)
- TAYLOR HOBSON, P. Guide to surface texture parameters. 2000.
- USMANI, S.; SAMPATH, S. Time-dependent friction response of plasma-sprayed molybdenum. **Wear**, v. 225-229, Part 2, n. 0, p. 1131-1140, 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00395-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00395-0)
- VIÁFARA, C. C.; SINATORA, A. Unlubricated sliding friction and wear of steels: An evaluation of the mechanism responsible for the T1 wear regime transition. **Wear**, v. 271, n. 9-10, p. 1689-1700, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.085>

VORBURGER, T. V.; RHEE, H.-G.; RENEGAR, T. B.; SONG, J.-F.; ZHENG, A. Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 33, n. 1, p. 110-118, 2007. 10.1007/s00170-007-0953-8

WHITENTON, E. P.; BLAU, P. J. A comparison of methods for determining wear volumes and surface parameters of spherically tipped sliders. **Wear**, v. 124, n. 3, p. 291-309, 1988. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90219-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90219-0)

WILLIAMS, J. **Engineering Tribology**. Cambridge University Press, 1994. ISBN 9780521609883.

XIA, L.; LI, G. The frictional behavior of DLC films against bearing steel balls and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> balls in different humid air and vacuum environments. **Wear**, v. 264, n. 11, p. 1077-1084, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.08.010>

YUAN, C. Q.; PENG, Z.; ZHOU, X. C.; YAN, X. P. The characterization of wear transitions in sliding wear process contaminated with silica and iron powder. **Tribology International**, v. 38, n. 2, p. 129-143, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2004.06.007>

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

ZUMGAHR, K. H.; MATHIEU, M.; BRYLKA, B. Friction control by surface engineering of ceramic sliding pairs in water. **Wear**, v. 263, p. 920–929, 2007.



## APÊNDICE I – Pré-testes com remoção de debris em aço ferramenta.

A Tabela AI 1 apresenta a composição química do aço ferramenta, utilizado nos pré-testes. Os valores indicados na tabela foram valores encontrados via Espectrometria de Emissão Óptica. Os resultados mostraram uma série de elementos em baixas quantidades, oriundos provavelmente de impurezas advindas da mineração. Dentre os elementos com maiores quantidades, destaca-se o Carbono na ordem de 0,1%, Cobre e Silício na ordem de 0,2%, Molibdênio aproximadamente 0,5%, Cromo na ordem de 0,7% e o Manganês na ordem de 1%, sendo compatível com um aço ferramenta classe P, que possuem dureza variando entre 30 e 36 HRC (COMMITTEE, 1990).

Tabela AI.1: Composição química do aço ferramenta utilizado nos pré-testes.

Elemento	Sn	B	W	Nb	Co	Ca	S	P	Ti
% peso	0,0002	0,0006	0,0007	0,0027	0,0037	0,0045	0,0087	0,0174	0,0184
Elemento	Ni	V	Al	C	Si	Cu	Mo	Cr	Mn
% peso	0,0282	0,0439	0,0545	0,1149	0,2262	0,2304	0,4731	0,6905	1,0482

A Figura AI.1 mostra a microestrutura do aço ferramenta utilizado nos pré-testes. Testes de dureza Vickers resultaram em valores de  $318 \pm 7$  Kgf/mm<sup>2</sup>. Observa-se uma estrutura refinada (Figura AI.1-a) e com maior ampliação (Figura AI.1-b) predominantemente martensítica após revenimento.

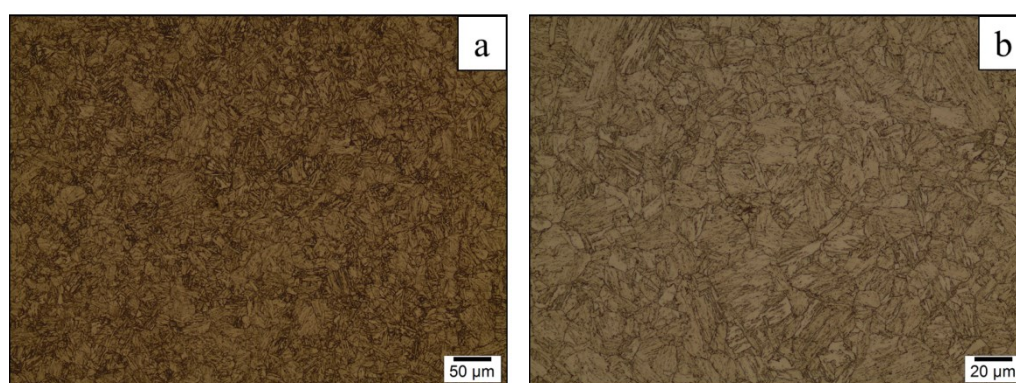


Figura AI.1: Microestrutura típica do aço ferramenta utilizado nos pré-testes. (a) Aspecto geral. (b) Detalhe.

A Figura AI.2 apresenta a topografia de superfície analisada via interferometria a laser para a amostra de aço ferramenta. Nota-se que a superfície da amostra (Figura AI.2) apresenta riscos/sulcos resultantes do processo de lixamento.

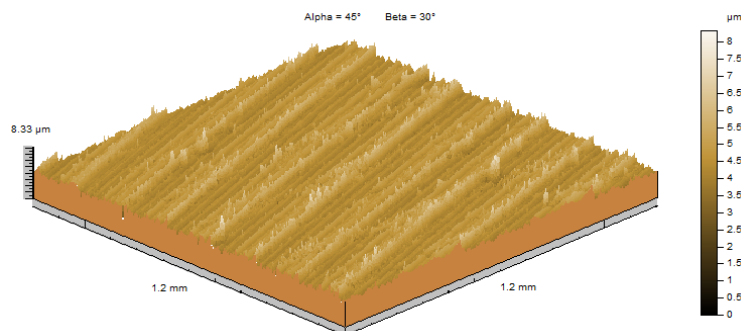


Figura AI.2: Mapa topográfico típico das amostras de aço ferramenta.

A Figura AI.3 apresenta os parâmetros topográficos para os contra corpos e para aço ferramenta utilizado nos pré-testes. Quando analisados os parâmetros da rugosidade quadrática média ( $S_q$ ), da altura dos picos da superfície ( $S_{pk}$ ) e da inclinação média das irregularidades ( $S_{dq}$ ), nota-se que o valor apresentado pelas amostras é cerca de uma ordem de grandeza maior que os apresentados pelos contra corpos, enquanto que os valores da capacidade de apoio ( $S_{bi}$ ) apresentaram valores cerca de duas vezes maiores para as amostras.

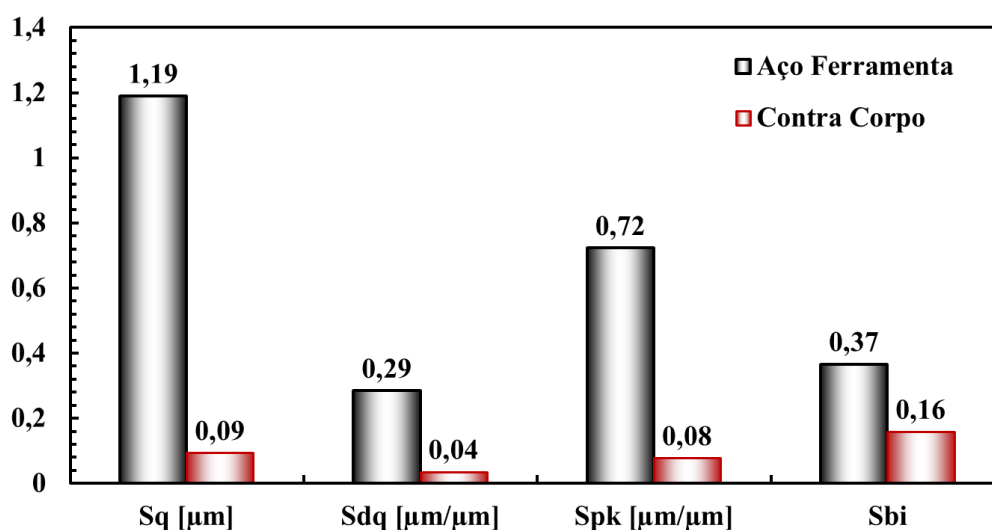


Figura AI.3: Parâmetros topográficos dos materiais usados nos pré-testes.

Inicialmente, foram executados pré-testes com remoção e sem remoção de debris, com um objetivo inicial do entendimento de qual seria o comportamento tribológico em um contato com ausência dos debris.

Os pré-testes foram executados com duração de 30 minutos e com carga normal de 22 N, aplicada via peso morto. Os pré-testes com remoção de debris foram efetuados utilizando um jato de ar comprimido para a remoção dos mesmos com pressão controlada (8 bar) durante todo o ensaio.

O coeficiente de atrito em função do número de ciclos e da posição sobre a amostra são mostrados na Figura AI.4. A Figura AI.4-a exemplifica o caso do teste a seco da amostra de aço ferramenta e a Figura AI.4-b, por sua vez, ilustra a evolução do coeficiente de atrito para o mesmo sistema tribológico sujeito à remoção dos debris.

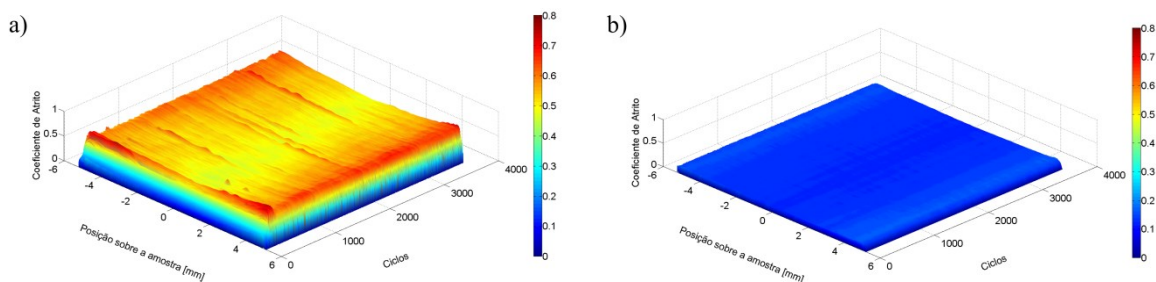


Figura AI.4: Evolução do coeficiente de atrito. (a) Sem remoção de debris. (b) Com remoção de debris.

Observa-se que o coeficiente de atrito aparece uniforme em ambas as condições, com um leve aumento nas bordas das marcas de desgaste para os ensaios sem remoção. A remoção dos debris (Figura AI.4-b) reduziu significativamente o coeficiente de atrito. A partir dos mapas triboscópicos 3D foi calculado o coeficiente de atrito em função do número de ciclos (2D), onde cada ponto representa a média em cada ciclo. A Figura AI.5 mostra a evolução do coeficiente de atrito médio em função do número de ciclos.

O coeficiente de atrito varia pouco durante os ensaios indicando o rápido estabelecimento do regime permanente. A remoção dos debris, como mostrado anteriormente, também pela Figura AI.4-b, contribuiu para uma significativa redução do coeficiente de atrito (aproximadamente 75%).

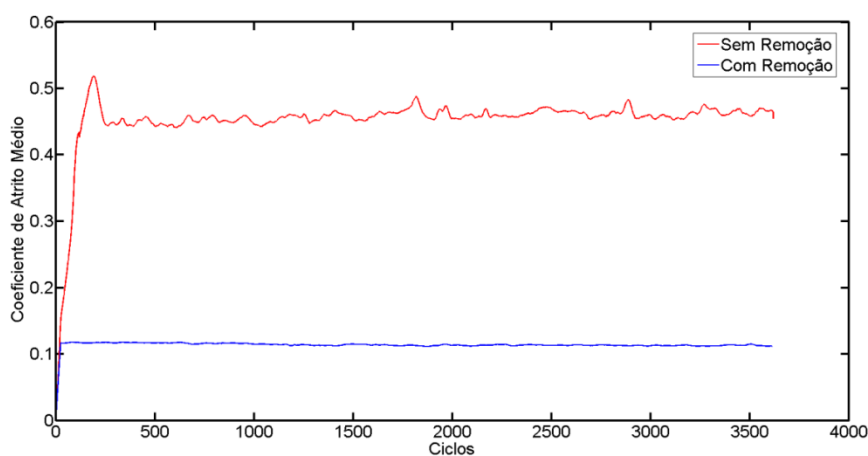


Figura AI.5: Evolução do coeficiente de atrito médio por ciclo.



Na Figura AI.6 é mostrada a evolução do potencial de contato em função da posição sobre a amostra e do número de ciclos. Observa-se que para o ensaio sem remoção, o potencial de contato aparece próximo de zero durante todo o teste, caracterizando um contato metal-metal. Já para o ensaio com remoção de debris, observa-se que o potencial de contato apresenta-se baixo no início, e segue aumentando no decorrer do ensaio até próximo de seu valor máximo (50 mV), indicando que o fluxo de ar poderia estar influenciando em uma possível formação de tribocamadas, que por sua vez, poderia reduzir o coeficiente de atrito.

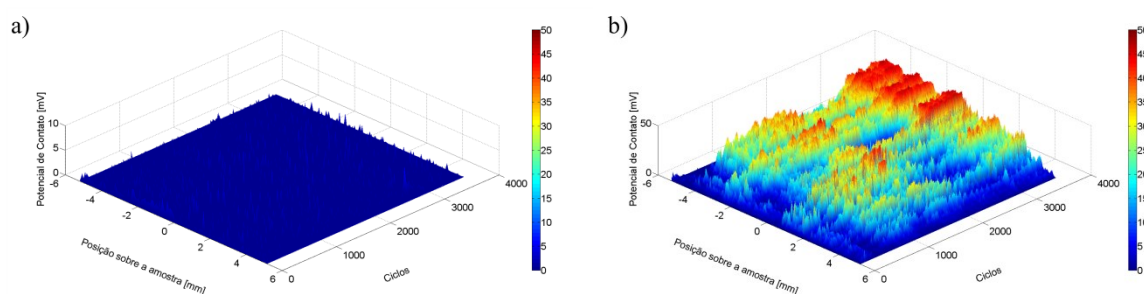


Figura AI.6: Evolução do potencial de contato. (a) Sem remoção de debris. (b) Com remoção de debris.

Geralmente, espera-se que a remoção dos debris dificulte a formação de uma tribocamada, pois estes desempenham papel fundamental na formação desta, como reportado por (IWABUCHI; KUBOSAWA; HORI, 1990; LEHEUP; PENDLEBURY, 1991; JIANG; STOTT; STACK, 1998). Porém, os resultados dos pré-testes se mostraram contrários a essa afirmação.

Na Figura AI.7 são apresentados perfis das marcas de desgaste, ilustrando o montante de desgaste apresentado pelos pré-testes realizados. A remoção dos debris (Figura AI.7-b) causou uma significativa redução no desgaste do sistema tribológico.

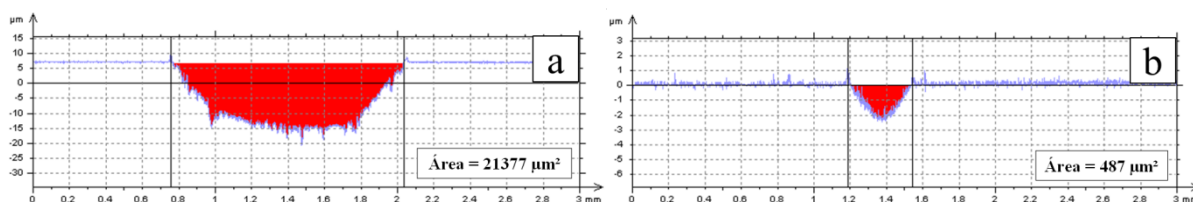


Figura AI.7: Perfis transversais das marcas de desgaste. (a) Sem remoção de debris. (b) Com remoção de debris.

Foram efetuados também, testes onde em um primeiro momento deste, foi feito sem remoção dos debris e em seguida houve a remoção dos mesmos, com a intenção de verificar num mesmo ensaio a influência da remoção dos debris do contato tribológico. A Figura AI.8-

a mostra a evolução do coeficiente de atrito em função da posição sobre a amostra e do número de ciclos. Já a Figura AI.8-b demonstra a evolução do coeficiente de atrito médio por ciclo em função do número de ciclos para o mesmo teste.

Percebe-se que ao iniciar a remoção (em torno de 1200 ciclos) o coeficiente de atrito sofre uma queda significativa e mantém-se em torno de 0,12 até o fim do ensaio, aproximando-se assim, dos valores de coeficiente de atrito encontrados nos ensaios anteriores.

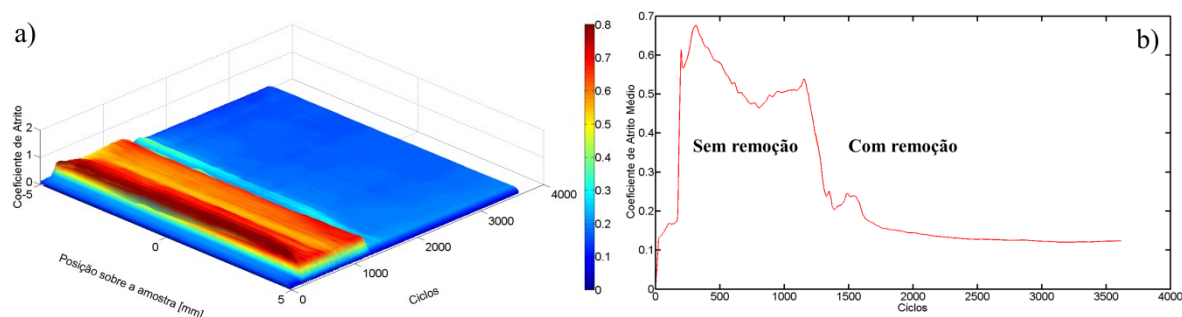


Figura AI.8: Evolução do coeficiente de atrito. (a) Mapa triboscópico 3D (b) Coeficiente de atrito médio por ciclo.

Os resultados apresentados para a remoção dos debris mostraram reduções em torno de 4 vezes no coeficiente de atrito e também, reduções ainda maiores para o desgaste (em torno de 44 vezes). Os valores de coeficiente de atrito encontrados foram relativamente baixos para um contato metal-metal seco, onde para um contato entre aços é de 0,7-0,8 segundo a literatura (ZUM GAHR, 1987; HUTCHINGS, 1992). Então, surgiu a dúvida da presença de contaminantes no sistema de ar comprimido, no caso, água (proveniente da umidade contida no ar captado pelo compressor) e óleo lubrificante do próprio compressor.

A Figura AI.9 e a Figura AI.10 mostram análises dos mecanismos de desgaste típicos para os pré-testes sem remoção e com remoção respectivamente.

Na Figura AI.9 é apresentada uma marca de desgaste típica para os ensaios sem remoção onde nota-se na Figura AI.9-a e na Figura AI.9-b a presença pequenas porções de tribocamadas. Na Figura AI.9-c e na Figura AI.9-d são apresentadas análises EDS para estas tribocamadas, se mostrando camadas ricas em oxigênio.

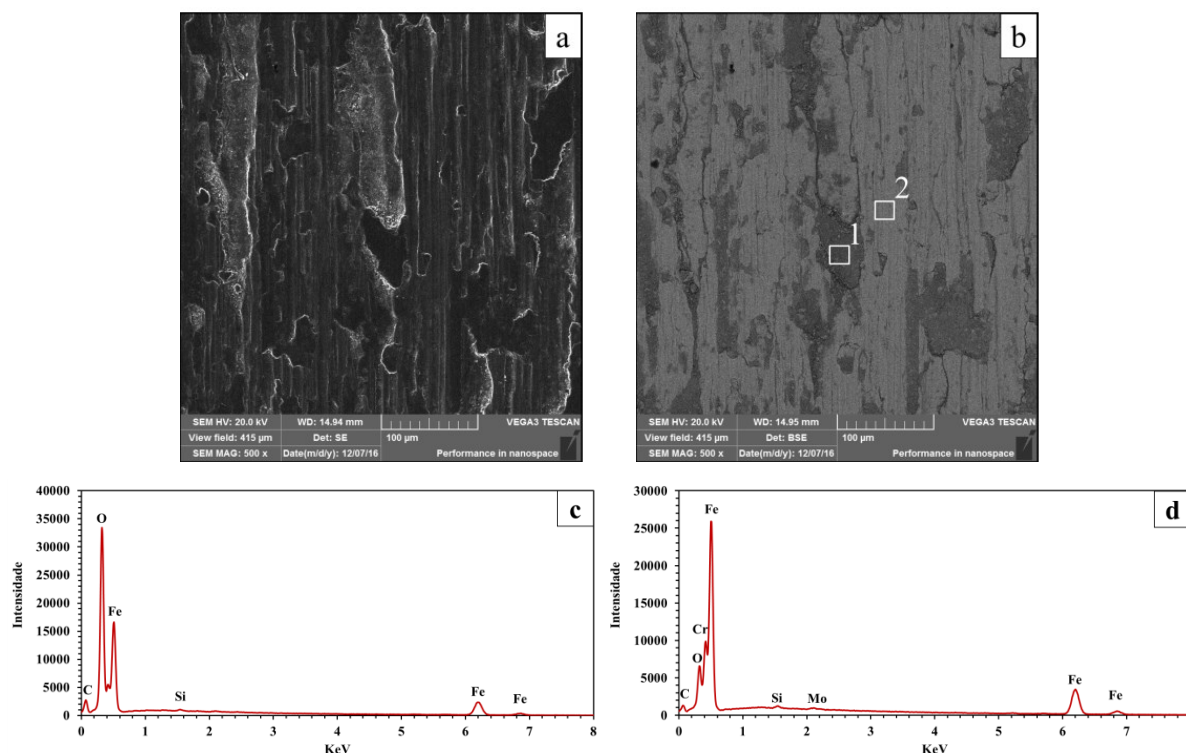


Figura AI.9: Análise via MEV-EDS de uma marca de desgaste típica dos ensaios realizados sem remoção de debris. (a) Imagem por elétrons Secundários (b) Imagem por elétrons retroespalhados, (c) Espectro EDS para a área 1, (d) Espectro EDS para a área 2.

Na Figura AI.10 é mostrada a marca de desgaste típica dos ensaios realizados removendo-se os debris, onde se observa na Figura AI.10-a e na Figura AI.10-b que as mesmas não apresentam formação de tribocamadas como apresentadas pelos ensaios sem a remoção dos debris (Figura AI.9), onde esta remoção poderia estar impedindo esta formação como comentado anteriormente. Adicionalmente, apresentam uma marca de desgaste mais lisa, indicando um mecanismo de desgaste suave, quando comparada com os ensaios sem a remoção dos debris. Na Figura AI.10-d e na Figura AI.10-e, estão exibidos respectivamente os espectros EDS relativos às áreas 2 e 3, identificadas na Figura AI.10-b. Nestas áreas constatou-se a presença de vários elementos químicos, sendo que parte destes elementos está presente na própria composição química do material, como: cálcio, titânio, alumínio, manganês, cromo e silício, demonstrado na Tabela AI.1. Contaminantes também podem ser advindos de contaminantes atmosféricos captados pelo compressor, além de poderem ser possíveis contaminantes do próprio compressor, como por exemplo, óleo lubrificante e água.

As análises via EDS apresentaram a presença de carbono em cerca de 30% em peso. O carbono poderia ser advindo da queima do óleo lubrificante devido ao calor gerado pelo compressor (MOERMAN; DEWULF, 2014). Esta presença de carbono poderia indicar que o ar comprimido estaria então contaminando o contato com óleo lubrificante, causando assim, a

diminuição do atrito e do desgaste. Adicionalmente, constatou-se em menores quantidades (cerca de 0,5%) a presença de fósforo, que está presente no óleo mineral (Air Oil 2000SS) do compressor utilizado para o sistema de remoção de debris, onde segundo o fabricante, há a presença de: 0,1 a 1% de fosfato de trifenilo e de fenol, isopropilado, fosfato (3:1). As presenças de zinco, cloro e enxofre também poderiam ser advindas de aditivos anti-desgaste e/ou extrema pressão (justificando a grande redução no desgaste para esta condição), assim como a presença de fósforo, como visto também na literatura em (FORBES, 1970; LIAN; YU; XUE, 1996; PAPAY, 1998; PIEKOSZEWSKI; SZCZEREK; TUSZYNSKI, 2001; SHARMA; ERDEMIR; ASWATH, 2015).

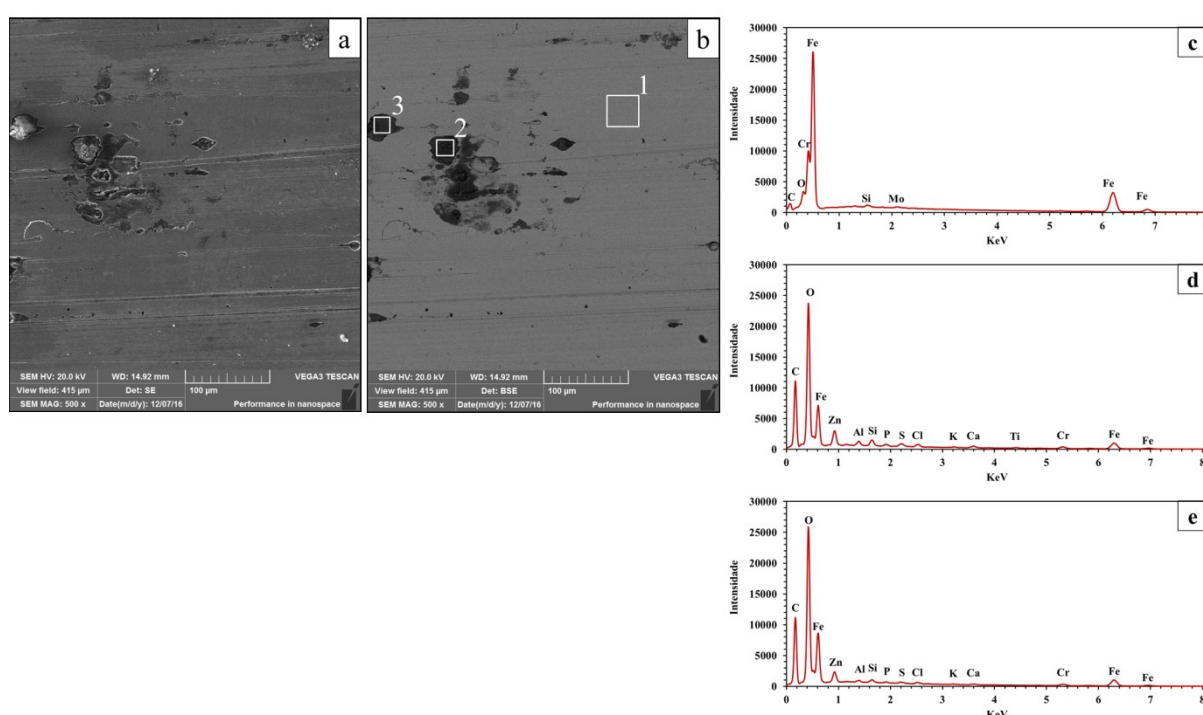


Figura AI.10: Análise via MEV-EDS dos ensaios efetuados com remoção de debris. (a) Imagem por elétrons Secundários (b) Imagem por elétrons retroespalhados, (c) Espectro EDS para a área 1, (d) Espectro EDS para a área 2, (e) Espectro EDS para a área 3.

Adicionalmente, foi instalado um sistema de secagem e filtragem de ar comprimido, com a intenção de eliminar potenciais impurezas existentes no sistema que poderiam estar mascarando o real efeito da remoção dos debris do contato tribológico.