

MÁRIO MARTINS DE OLIVEIRA JÚNIOR

LUBRIFICAÇÃO SÓLIDA EM MEIO FLUIDO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2013

MÁRIO MARTINS DE OLIVEIRA JÚNIOR

LUBRIFICAÇÃO SÓLIDA EM MEIO FLUIDO

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello

Uberlândia – MG

2013

O48L Oliveira Júnior, Mário Martins de, 1987-
2013 Lubrificação sólida em meio fluido / Mário Martins de Oliveira
 Júnior. - 2013.
 94 f. : il.

Orientador: José Daniel Biasoli de Mello.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
grama de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Lubrificação e lubrificantes - Teses. I. Mello, José Daniel Biasoli de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

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

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

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

Aos meus pais Mário e Marina, por terem sempre acreditado que os valores, os estudos e a afetividade são fundamentais para a formação humana. Meu muito obrigado pelo apoio incondicional de vocês em minha vida. Às minhas irmãs Cíntia e Letícia, pelo incentivo. Ao meu cunhado e amigo Vasco, pelo incentivo, força e amizade.

À minha namorada Camila, de forma muito especial. Obrigado pela paciência, oferecendo ajuda e apoio afetivo. Obrigado por ter tido serenidade para compreender os momentos de crise e dificuldades.

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 de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina e à empresa Whirlpool S.A., pelo fornecimento das amostras.

Ao Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina que contribuiu de forma significativa para a realização das análises via microscopia eletrônica de varredura.

À Capes e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

OLIVEIRA JÚNIOR, M. M. **Lubrificação sólida em meio fluido**. 2013. 94f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Resumo

Com o intuito de diminuir o atrito e o desgaste nos pares tribológicos, faz-se a inserção de lubrificantes no contato entre as superfícies separando-as por um filme lubrificante.

Na maioria das aplicações tribológicas, lubrificantes líquidos ou graxa são utilizados para combater o atrito e o desgaste. Mas quando as condições tornam-se muito severas, os lubrificantes sólidos podem ser a única opção para controlar o atrito e o desgaste.

Uma combinação de lubrificantes sólidos e líquidos é viável e pode ter um efeito sinérgico benéfico na redução do atrito e no aumento da resistência ao desgaste das superfícies de deslizamento, em especial nos regimes elasto-hidrodinâmico e limite de lubrificação.

Com o advento da técnica de metalurgia do pó, torna-se viável a produção de novos materiais, os quais permitem que o lubrificante sólido seja incorporado ao volume da matriz na etapa de mistura do pó.

Este trabalho visa estudar 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 alternativo.

A utilização simultânea de lubrificantes sólidos e líquidos produziu uma diminuição significativa no coeficiente de atrito (25%) quando comparado com a adição do lubrificante líquido apenas, sugerindo a existência de uma sinergia positiva entre os lubrificantes sólidos e líquidos. Esta ação conjunta aumenta significativamente a durabilidade do regime de lubrificação do sistema (3 ordens de grandeza), reduz o coeficiente de atrito (cerca de 4x) e a taxa de desgaste em 50%.

Adicionalmente, a utilização da técnica triboscópica possibilitou, de uma maneira original, constatar um significativo aumento do coeficiente de atrito nas extremidades das marcas de desgaste das ligas ferrito-perlíticas. Esta variação do coeficiente de atrito com a posição foi discutida em termos do acúmulo de debris e da mudança do regime de lubrificação associados com a dinâmica do movimento alternativo, tendo sido atribuído ao primeiro um papel preponderante.

OLIVEIRA JÚNIOR, M. M. **Solid Lubrication in Fluid Environment**. 2013. 94p. M. Sc. Dissertation. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Abstract

In order to reduce friction and wear in tribological pairs, the insertion of lubricant between the surfaces in contact separates them by a lubricant film.

In most tribological applications, liquid lubricants or grease are used to combat friction and wear. But when service conditions become very severe, solid lubricants may be the only choice to control friction and wear.

A combination of solid and liquid lubrication is also feasible and may have a beneficial synergistic effect on the friction and wear performance of sliding surfaces. It occurs particularly in the boundary and elasto-hydrodynamic regime of lubrication.

With advent of the powder metallurgy technique, the production of new materials having solid lubricants particles embedded in the metallic matrix became feasible.

This work aims to study the combined effect of solid lubrication (sintered composites which contains particles of solid lubricant dispersed in a metallic matrix, by a basic mixing process), with the presence of a liquid lubricant in cooperative lubrication regime in reciprocating sliding wear configuration.

A significant reduction, when compared with the addition of liquid lubricant alone, in friction coefficient (25%) was produced by the simultaneous utilization of solid and liquid lubricants, suggesting the existence of a beneficial synergy between the liquid and solid lubricants. This combined action increased significantly the durability of the lubricious regime (3 orders of magnitude), reduced the friction coefficient (about 4x) and the wear rate by 50%.

Additionally, the use of triboscopy technique enabled (in an original form) to verify a significant increase in the friction coefficient at the wear marks of a ferrite perlite alloys. This difference between the friction coefficient according to the position was discussed in terms of debris accumulation and a change in lubrication regime, both associated with the reciprocating motion dynamics having been assigned to the first a preponderant role.

Keywords: Self-lubricating alloys. Liquid lubrication. Triboscopy

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Ilustração esquemática de estruturas cristalinas em camadas para: (a) grafite, (b) nitreto de boro hexagonal, (c) bissulfeto de molibdênio e (d) ácido bórico.....	05
Figura 2.2: Curva de Stribeck teórica. Onde: n = Viscosidade do fluido; U = Velocidade de deslizamento e N = Carga Normal.....	08
Figura 2.3: Ilustração dos regimes de lubrificação em função do movimento do pistão.....	09
Figura 2.4: Modelo microestrutural de um compósito autolubrificante ideal.....	12
Figura 2.5: Aspectos típicos da microestrutura. Liga Fe +0,6%C +4%Ni. (a) matriz metálica, (b), adicionados 2% de SiC, (c) nódulo de grafite, (d) camada de grafite.....	13
Figura 2.6: Efeito do teor de SiC e da temperatura de sinterização no comportamento tribológico. (a) coeficiente de atrito; (b) durabilidade.....	14
Figura 2.7: Coeficiente de atrito.....	16
Figura 2.8: Taxa de desgaste dos aços autolubrificantes e das esferas de aço AISI 52100.....	16
Figura 2.9: Típicos espectros Raman. (a) espécime C-Fe-Ni-Mo; (b) contra corpo C-Fe-Ni-Mo; (c) espécime Fe-C, centro da marca de desgaste; (d) contra corpo Fe-C, centro da marca de desgaste.....	17
Figura 2.10: Resistência Máxima à Tração.....	19
Figura 2.11: Aspecto da superfície da amostra compactada a 700 MPa. (a) Imagem gerada por MEV por elétrons retroespalhados; (b) análise por EDS do ponto 1; (b) análise por EDS do ponto 2.....	19
Figura 2.12: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio.....	20
Figura 2.13: Taxa de desgaste. (a) Amostras; (b) Contra corpos.....	20
Figura 2.14: Mecanismo de desgaste típico. MEV. Amostra SP-500.....	21
Figura 2.15: Mecanismo de desgaste típico. MEV. (a) Amostra SP-700; (b) análise via EDS para a região 1; (b) análise via EDS para a região 2.....	22

Figura 2.16: Mecanismo de desgaste típico. (a) Imagem do contra corpo gerada por MEV por elétrons retroespalhados; (b) análise via EDS para a região 1; (b) análise via EDS para a região 2.....	23
Figura 2.17: Durabilidade dos compostos testados.....	23
Figura 2.18: Cortes transversais. MEV. (a) SP-500; (b) DP.....	24
Figura 2.19: Efeito da técnica de compactação na porosidade.....	24
Figura 3.1: Ilustração do Tribômetro Plint TE67 utilizado nos ensaios.....	27
Figura 3.2: Exemplo de uma imagem triboscópica 3D.....	27
Figura 3.3: Modelo de uma calota esférica.....	30
Figura 3.4 – Representação gráfica do parâmetro S_{pk}	32
Figura 4.1: Amostra C.....	34
Figura 4.2: Amostra P.....	34
Figura 4.3: Amostra P. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons retroespalhados para a amostra P, (b) Análise via EDS para a região 1 e (c) Análise via EDS para a região 2.....	35
Figura 4.4: Microdureza $HV_{0,2}$ das amostras autolubrificantes.....	36
Figura 4.5: Metalografia do contra corpo utilizado nos ensaios.....	36
Figura 4.6: Mapa topográfico das amostras. (a) Amostra C; (b) amostra P; (c) amostra CM e (d) Amostra PM.....	37
Figura 4.7: Mapa topográfico do contra corpo.....	38
Figura 4.8: Parâmetros topográficos dos materiais utilizados nos ensaios.....	38
Figura 4.9: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra. (a) e (b) Ensaio seco, ao ar; (c) e (d) Ensaio lubrificado com óleo. À esquerda amostra C e à direita amostra P.....	39

Figura 4.10: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra. (a) e (b) Ensaio seco, ao ar; (c) e (d) Ensaio lubrificado com óleo. À esquerda amostra CM e à direita amostra PM.....	40
Figura 4.11: Densidade de Partículas em função do tempo de ensaio.....	41
Figura 4.12: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio.....	42
Figura 4.13: Evolução do coeficiente de atrito em função do aumento da densidade de debris.....	43
Figura 4.14: Perfis transversais das marcas de desgaste. (a) Amostra C; (b) Amostra P.....	44
Figura 4.15: Aspecto típico da distribuição das partículas de desgaste. (a) Liga P. (b) Liga C.....	44
Figura 4.16: Durabilidade para os ensaios a seco para as amostras testadas.....	45
Figura 4.17: Imagens obtidas em MEV por elétrons retroespalhados para as amostras: a) C e b) P, ambas ensaiadas a seco.....	46
Figura 4.18: Marcas de desgaste. MEV por elétrons retroespalhados. (a) Amostra P; (b) Amostra C; (c) Amostra PM e (d) Amostra CM.....	47
Figura 4.19: Durabilidade para os ensaios lubrificados com óleo LAB 240 para as amostras testadas.....	48
Figura 4.20: Comparativo da durabilidade para todos os ensaios efetuados.....	48
Figura 4.21: Carga crítica de durabilidade a seco para cada amostra.....	49
Figura 4.22: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra. Ensaio seco, ao ar. (a) Amostra C; (b) Amostra P; (c) Amostra CM e (d) amostra PM.....	50
Figura 4.23: Coeficiente de atrito médio para as amostras testadas.....	50
Figura 4.24: Imagens obtidas via interferometria a laser para as amostras: (a) C, (b) CM, (c) P, (d) PM.....	51

Figura 4.25: Taxa de desgaste.....	52
Figura 4.26: Mecanismos de desgaste. MEV. (a) e (b) Amostra C; (c) e (d) Amostra CM. À esquerda imagens produzidas por elétrons secundários e à direita imagens produzidas por elétrons retroespalhados.....	53
Figura 4.27: Mecanismos de desgaste para a amostra C. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS da região 1 e (d) Análise via EDS da região 2.....	54
Figura 4.28: Mecanismos de desgaste para a amostra CM. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS da região 1 e (d) Análise via EDS da região 2.....	55
Figura 4.29: Mecanismos de desgaste. MEV. (a) e (b) Amostra P; (c) e (d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.....	56
Figura 4.30: Mecanismos de desgaste para a amostra P. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS da região 1 e (d) Análise via EDS da região 2.....	57
Figura 4.31: Mecanismos de desgaste para a amostra PM. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS da região 1 e (d) Análise via EDS da região 2.....	58
Figura 4.32: Taxa de desgaste para o contra corpo.....	58
Figura 4.33: Mecanismos de desgaste para os contra corpos. MEV. (a) e (b) Amostra C; (c) e (d) Amostra CM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.....	59
Figura 4.34: Mecanismos de desgaste para o contra corpo da amostra CM. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS para a região 1.....	60
Figura 4.35: Mecanismos de desgaste para o contra corpo da amostra CM. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS para a região 1.....	61

Figura 4.36: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra. (a) e (b) Ensaio seco, ao ar; (c) e (d) Ensaio lubrificado com óleo. À esquerda amostra P e à direita amostra PM.....	62
Figura 4.37: Coeficiente de atrito médio total para os ensaios efetuados.....	63
Figura 4.38: Imagens obtidas via interferometria a laser para as amostras: (a) P, (b) PM, (c) P Óleo, (d) PM Óleo.	64
Figura 4.39: Taxa de desgaste para as amostras P e PM.....	64
Figura 4.40: Mecanismos de desgaste. MEV. (a) e (b) Amostra P; (c) e (d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.....	65
Figura 4.41: Mecanismos de desgaste. MEV. (a) e (b) Amostra P; (c) e (d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.....	66
Figura 4.42: Imagens obtidas por MEV das amostras ensaiadas com óleo. a) e b) Amostra P; c) e d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.....	67
Figura 4.43: Imagens obtidas por MEV das amostras ensaiadas com óleo. a) e b) Amostra P; c) e d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.....	68
Figura 4.44: Taxa de desgaste do contra corpo para os ensaios efetuados.....	69
Figura 4.45: Imagens obtidas por MEV produzidas por elétrons secundários para os contra corpos ensaiados na condição de seco para as amostras: a) P e b) PM.....	69
Figura 4.46: Mecanismos de desgaste para os contra corpos. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários para a amostra P, (b) por elétrons retroespalhados para a amostra P, (c) por elétrons secundários para a amostra PM, (d) por elétrons retroespalhados para a amostra PM (e) EDS típica.....	70
Figura 4.47: Mecanismos de desgaste para os contra corpos. MEV. (a) e (b) Amostra P; (c) e (d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparação entre os lubrificantes sólidos, líquidos e graxas com relação à aplicabilidade e ambiente inseridos.....	07
Tabela 3.1: Composição química das amostras sinterizadas.....	25
Tabela 3.2: Pós utilizados na confecção das amostras sinterizadas.....	25
Tabela 3.3 - Composição química do aço SAE 52100 (porcentagem em peso).....	28
Tabela 3.4: Propriedades do óleo LAB 240.....	29

LISTA DE SÍMBOLOS

μ : coeficiente de atrito

AISI: “*American Iron and Steel Institute*”

EDS: espectroscopia de energia dispersiva

eV: elétron-volt

HV: dureza Vickers

LVDT: “*Linear Variable Differential Transformer*”

MEV: microscópio eletrônico de varredura

MPI: moldagem de pós por injeção

PADS: processo de extração e sinterização assistida por plasma

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.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução.....	01
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	05
Capítulo 3 – Metodologia.....	25
3.1 – Materiais.....	25
3.2 – Ensaios de microdureza.....	26
3.3 – Caracterização tribológica.....	26
3.4 – Interferometria a laser.....	29
3.5 – Medição do desgaste do contra corpo.....	30
3.6 – Avaliação topográfica dos materiais utilizados.....	31
3.7 – Análise dos debris de desgaste.....	32
3.8 – Avaliação dos mecanismos de desgaste.....	33
Capítulo 4 – Resultados e Discussão.....	34
4.1 – Caracterização metalográfica e dureza.....	34
4.2 – Ensaios de Durabilidade (Carga variável).....	39
4.3 – Ensaios com Carga Constante.....	49
4.3.1 – Carga de 27,5 N.....	49
4.3.2 – Carga de 13,75 N.....	61
Capítulo 5 – Conclusão.....	72
Capítulo 6 – Trabalhos Futuros.....	74
Capítulo 7 – Referências Bibliográficas.....	75

CAPÍTULO I

Introdução

Quando duas superfícies se encontram em contato e movimento relativo, aparecem forças que dificultam/impedem tal movimento, as quais são chamadas de forças de atrito. Devido a estas forças de atrito, grande parte da energia empregada na movimentação dos componentes de sistemas mecânicos é dissipada. Juntamente com o atrito, há também o desgaste destes componentes, fazendo com que estes tenham uma vida útil reduzida.

Com o intuito de diminuir o atrito e o desgaste nos pares tribológicos, faz-se a inserção de lubrificantes no contato entre as superfícies, separando-as por um filme lubrificante. Atualmente, foram desenvolvidos novos lubrificantes e novos conceitos de lubrificação, objetivando uma maior lubricidade nos sistemas tribológicos.

Na maioria das aplicações tribológicas, lubrificantes líquidos ou graxa são utilizados para combater o atrito e o desgaste, mas quando as condições tornam-se muito severas (ou seja, temperaturas muito elevadas ou muito baixas, ambiente em vácuo, radiação, pressões de contato extremas, limpeza e higiene, alimentos e farmacêutico, etc.), os lubrificantes sólidos podem ser a única opção para controlar o atrito e o desgaste (ERDEMIR, 2001).

A lubrificação sólida é uma das opções mais promissoras para controlar o atrito e desgaste com consequente ganho na eficiência energética dos sistemas mecânicos. Uma combinação de lubrificantes sólidos e líquidos é viável e pode ter um efeito sinérgico benéfico na redução do atrito e no aumento da resistência ao desgaste das superfícies de deslizamento, em especial nos regimes elasto-hidrodinâmica e limite de lubrificação (DE MELLO et al., 2009).

Em vários sistemas mecânicos, por exemplo, nos pistões de motores de combustão interna, o movimento entre os corpos se dá de forma recíproca, onde estão presentes os regimes de lubrificação hidrodinâmica, elasto-hidrodinâmica e limite.

Diante disso, torna-se necessária a adição de outro tipo de lubrificante, que neste caso é um lubrificante sólido adicionado no volume do material, na tentativa de formar um

tribofilme sobre as asperidades em contato, a fim de diminuir o coeficiente de atrito e consequentemente o desgaste.

Com o advento da técnica de metalurgia do pó, utilizada na fabricação de materiais sinterizados, torna-se viável a produção de novos materiais, pois permite que o lubrificante sólido seja incorporado ao volume da matriz na etapa de mistura do pó (BINDER, 2009).

Nos últimos anos, compósitos autolubrificantes têm sido estudados em diversas aplicações. Sendo assim, a produção de compósitos autolubrificantes contendo partículas de segunda fase incorporadas no volume dos materiais parece ser uma solução promissora (DONNET; ERDEMIR, 2004; PAULEAU; THIÈRY, 2004; ERDEMIR, 2005).

Existem duas maneiras para dispersar as partículas de lubrificante sólido no volume de uma matriz metálica, a fim de obter um composto sinterizado autolubrificante. A primeira é por geração “in situ” de partículas de fase de lubrificante sólido, durante a sinterização através da dissociação de um precursor misturado aos pós metálicos. Já a segunda dispersão é através da mistura de pós de lubrificante sólido, com pós metálicos por um processo de mistura simples (BINDER et al., 2008; KLEIN et al., 2009).

Recentemente, (BINDER et al., 2010) apresentaram o efeito da quantidade de precursor e da temperatura de sinterização na durabilidade e no coeficiente de atrito de novos aços autolubrificantes produzidos pelo processo de moldagem de pós por injeção (MPI). Foi constatado pelo autor que, independentemente da temperatura de sinterização, o aumento do teor do precursor e, como consequência, o aumento no número de nódulos de grafite produziu uma redução do coeficiente de atrito médio aumentando a durabilidade da tribocamada com 2% de SiC adicionado como precursor (DE MELLO et al., 2013b).

Em outro trabalho, (HAMMES et al., 2013; SCHROEDER et al., 2013) estudaram o comportamento tribológico de ligas autolubrificantes a seco. A composição da matriz foi baseada numa liga de Fe-1.5Mo-1.0Si-0.8C, enquanto que os lubrificantes sólidos foram hBN e grafite (2,5% e 5% em peso respectivamente) misturados aos pós metálicos por um processo de mistura simples. Os compostos foram produzidos com diferentes compactações, onde estes foram compactados a 500 MPa, 700 MPa e com dupla sinterização e compactação a 500 e 700 MPa.

Nos testes efetuados com carga constante para tais materiais, não houve diferença significativa no coeficiente de atrito. Imagens via MEV mostraram a presença de reservatórios ativos de lubrificantes sólidos mesmo após o ensaio, o que, em princípio, garantiria o reabastecimento de lubrificantes sólidos no contato, mantendo o sistema lubrificado. Para a

durabilidade, o efeito da compactação teve uma forte influência produzindo aumento de 40% com uma maior pressão de compactação e cerca de 130% com a dupla compactação(SCHROEDER et al., 2013).

Diante disso, este trabalho visa estudar 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 adição de um lubrificante líquido em regime de lubrificação conjunta em uma configuração de desgaste por deslizamento alternativo.

Visando entender o comportamento tribológico das ligas autolubrificantes trabalhando juntamente com lubrificação fluida, faz-se necessário investigar o regime de lubrificação limite com a presença de lubrificante sólido no volume do material. Nesse sentido, é necessário o estudo sobre a influência da natureza da matriz no comportamento tribológico de ligas autolubrificantes e, por fim, o entendimento do efeito da presença de lubrificante líquido no comportamento tribológico das ligas matriz e autolubrificantes.

Foi estudado detalhadamente por (SHERRINGTON; HAYHURST, 2001) 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.

As combinações que envolvem os aços mais duros apresentaram as menores taxas de formação de debris. Adicionalmente, os autores mostraram nas combinações que envolvem aços com maiores diferenças de durezas, as maiores taxas de formação de debris e consequentemente que o coeficiente de atrito aumenta com maior intensidade para o par com menor dureza decorrendo da maior formação de debris de desgaste.

No Capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre lubrificantes sólidos e líquidos e também sobre compósitos autolubrificantes, onde é abordado o comportamento tribológico de diferentes ligas estudadas 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

Este capítulo mostra uma breve revisão sobre os lubrificantes sólidos, líquidos, aços sinterizados por metalurgia do pó e seu processamento.

Quando duas superfícies se encontram em contato e movimento relativo, aparecem forças que dificultam/impedem tal movimento, as quais são chamadas de forças de atrito. Devido a estas forças de atrito, grande parte da energia empregada na movimentação dos componentes de sistemas mecânicos é dissipada. Juntamente com o atrito, há também o desgaste destes componentes, fazendo com que estes tenham uma vida útil reduzida.

Recentemente, estimou-se que o custo anual com o desgaste e com a energia dissipada por atrito foi cerca de 5 a 7% dos produtos nacionais brutos da maioria dos países industrializados. A redução ou até mesmo a eliminação da perda de energia por atrito seria extremamente benéfica para a economia destes países, bem como a preservação dos recursos energéticos cada vez menores e também do meio ambiente (ERDEMIR; MARTIN, 2007). Em razão disto, uma série de pesquisas sobre materiais tribológicos foram realizadas nas últimas décadas, visando reduzir o atrito e o desgaste (RAPOPORT et al., 1999; PAVANATI et al., 2008; DE MELLO et al., 2009).

Com o intuito de diminuir o atrito e o desgaste nos pares tribológicos, faz-se a inserção de lubrificantes no contato entre as superfícies separando-as por um filme lubrificante. Atualmente, foram desenvolvidos novos lubrificantes e novos conceitos de lubrificação, objetivando uma maior lubricidade nos sistemas tribológicos.

Na maioria das aplicações tribológicas, lubrificantes líquidos ou graxa são utilizados para combater o atrito e o desgaste, mas quando as condições tornam-se muito severas (ou seja, temperaturas muito elevadas ou muito baixas, ambiente em vácuo, radiação, pressões de

contato extremas, limpeza e higiene, alimentos e farmacêutico, etc.), os lubrificantes sólidos podem ser a única opção para controlar o atrito e o desgaste (ERDEMIR, 2001).

Diversos materiais inorgânicos (por exemplo, bissulfeto de molibdênio (MoS_2), grafite (C), nitreto de boro hexagonal (hBN), ácido bórico (H_3BO_3) podem proporcionar uma excelente lubrificação (CLAUSS, 1972; SLINNEY, 1982; LANCASTER, 1984; MCMURTREY, 1985; SUTOR, 1991; LANSDOWN, 1999). A maioria destes sólidos deve a sua lubricidade a sua estrutura lamelar ou cristalina em camadas como ilustrado na Figura 2.1.

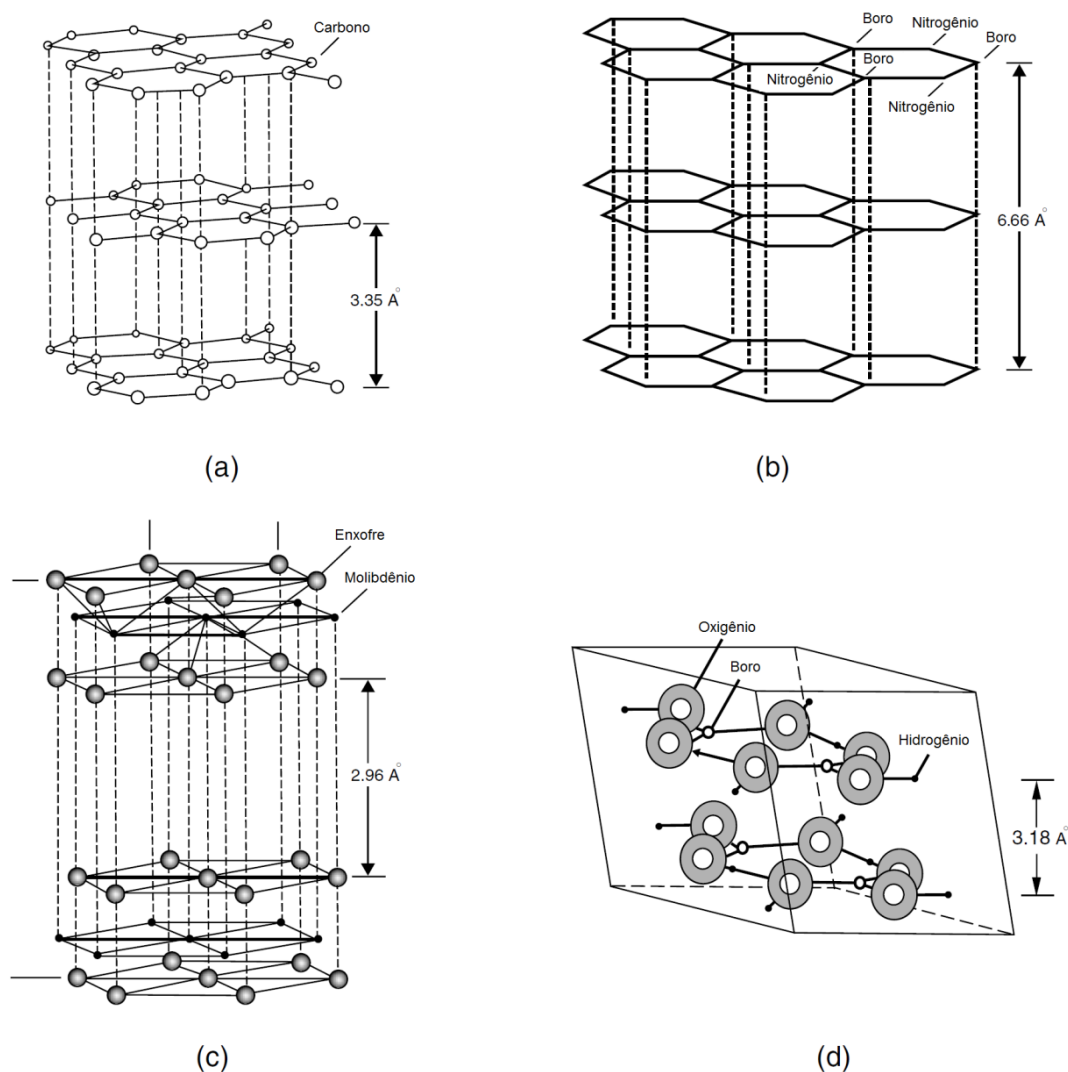


Figura 2.1: Ilustração esquemática de estruturas cristalinas em camadas para: (a) grafite, (b) nitreto de boro hexagonal, (c) bissulfeto de molibdênio e (d) ácido bórico (ERDEMIR, 2001).

Quando presentes em uma interface de deslizamento, os lubrificantes sólidos lamelares possuem um funcionamento bem parecido com os lubrificantes líquidos que quando no contato, cisalham facilmente para proporcionar baixo atrito na tentativa de evitar o desgaste por deslizamento entre as superfícies (ERDEMIR, 2001).

Ainda segundo este autor, os lubrificantes sólidos também possuem grandes deficiências, tais como:

- Com exceção dos metais macios, os lubrificantes sólidos são pobres condutores térmicos e, portanto, não possuem a função de retirar calor da interface.
- Dependendo do ambiente de teste e condições de contato, seus coeficientes de atrito podem ser altos ou flutuar significativamente.
- Eles têm uma vida de desgaste finita e sua reconstituição é mais difícil do que a de lubrificantes líquidos.
- A oxidação e degradação associada ao envelhecimento podem ocorrer ao longo do tempo e apresentar alguns problemas com metais de transição dicalcogenídeos.
- Após a exposição a temperaturas elevadas ou em ambientes oxidantes, podem sofrer mudanças químico-estruturais irreversíveis que, por sua vez, levam à perda de capacidade de lubrificação e à geração de subprodutos não lubrificantes ou até mesmo abrasivos.

Os lubrificantes líquidos, além de proporcionarem a lubrificação dos mecanismos, também fornecem amortecimento e arrefecimento. Por concepção apropriada do sistema de lubrificação, um lubrificante líquido pode controlar a temperatura de um conjunto mecânico dentro de uma gama de temperaturas muito estreita se necessário. Por esta razão, os lubrificantes líquidos e graxas são mais amplamente utilizados do que os lubrificantes sólidos ou revestimentos duros (GSCHWENDER et al., 2001).

É necessário entender, para cada aplicação, os fenômenos tribológicos atuantes. Isso porque, desta maneira, pode-se selecionar o tipo de lubrificante correto para cada caso em estudo. Ao serem entendidas as características de cada lubrificante e de posse delas, as vantagens de cada lubrificante se aliam a cada condição de operação. A Tabela 2.1 mostra uma comparação do comportamento dos lubrificantes em relação à sua aplicação no ambiente ou condição em que estão inseridos.

Tabela 2.1: Comparação entre os lubrificantes sólidos, líquidos e graxas com relação à aplicabilidade e ambiente (ERDEMIR, 2001).

Ambiente ou condição	Lubrificantes Sólidos	Lubrificantes Líquidos e Graxas
Vácuo	Alguns sólidos (i.e., metais de transição dicalcogenídeos) lubrificam extremamente bem em alto vácuo e possuem pressão de vapor muito baixo	A maior parte dos líquidos evaporam mas o perfluoropolialquileto (PFPE) e polialfaolefinos (PAO) tem boa durabilidade
Pressão	Podem suportar pressões extremas	Não suportam pressões extremas sem aditivos
Temperatura	Relativamente insensíveis, funcionam em altas e baixas temperaturas	Podem solidificar em baixas temperaturas, se decompor ou oxidar a altas temperaturas
Condutividade elétrica	Alguns possuem excelente condutividade elétrica	São praticamente isolantes
Radiação	Relativamente insensíveis à radiação ionizante	Podem se decompor ou degradar em pouco tempo
Desgaste	Possuem excelente desempenho no desgaste ou durabilidade em baixas velocidades e em condições de <i>fretting</i> . A vida é determinada pela espessura e pelo coeficiente de desgaste dos filmes	Possui desempenho rápido, durabilidade em baixas velocidades e baixo <i>fretting</i> , necessitam de aditivos para promover condições de lubrificação
Atrito	Coeficiente de atrito é extremamente baixo	Depende da viscosidade, da espessura do filme e da temperatura
Condutividade térmica e capacidade de dissipação de calor	Excelente para os lubrificantes metálicos e ruim para a maioria dos inorgânicos e os sólidos lamelares	Bons condutores térmicos e dissipadores de calor
Armazenagem	Podem ser armazenados por longo tempo (dicalcogenídeos são sensíveis à umidade e oxigênio)	Podem evaporar, exaurir ou vaziar durante o armazenamento
Higiene	São higiênicos para indústria, pois no estado sólido não ocorre perigo de derrames que podem contaminar o ambiente.	Os lubrificantes líquidos podem derramar ou gotejar e contaminar o meio ambiente. Alguns óleos e graxas podem ser inflamáveis
Compatibilidade com superfícies tribológicas	Compatível com superfícies de difícil lubrificação (i.e. Al, Ti, aço rápido, cerâmica)	Não é adequado ao uso em materiais não ferrosos ou revestimentos em cerâmica
Resistência a ácidos e ambientes aquosos e quimicamente agressivos	Relativamente insensíveis a ambientes aquosos, solventes químicos, combustíveis, ácidos e certas bases	Podem ser afetados ou alterados por ambientes aquosos

A lubrificação sólida é uma das opções mais promissoras para controlar o atrito e desgaste com consequente ganho na eficiência energética dos sistemas mecânicos. Uma combinação de lubrificantes sólidos e líquidos é viável e pode ter um efeito sinérgico benéfico

na redução do atrito e no aumento da resistência ao desgaste das superfícies de deslizamento, em especial no regime elasto-hidrodinâmica de lubrificação (DE MELLO et al., 2009).

A lubrificação hidrodinâmica somente é efetiva quando existe um valor apreciável na relação entre a velocidade de deslizamento, a viscosidade do fluido lubrificante e a carga aplicada entre os corpos. À medida que o valor desta relação decresce, a espessura do filme lubrificante também é reduzida, ao se manter a pressão de contato entre os corpos. Quando a espessura do filme lubrificante é reduzida a valores tais que os pontos altos ou pequenas asperezas em cada superfície entram em contato, provocam aumento do coeficiente de atrito e consequentemente um aumento no desgaste (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

A Figura 2.2 mostra variação do coeficiente de atrito com a relação entre os parâmetros velocidade, viscosidade e carga aplicada para um mesmo fluido lubrificante a uma mesma pressão de contato, representada pela curva de Stribeck.

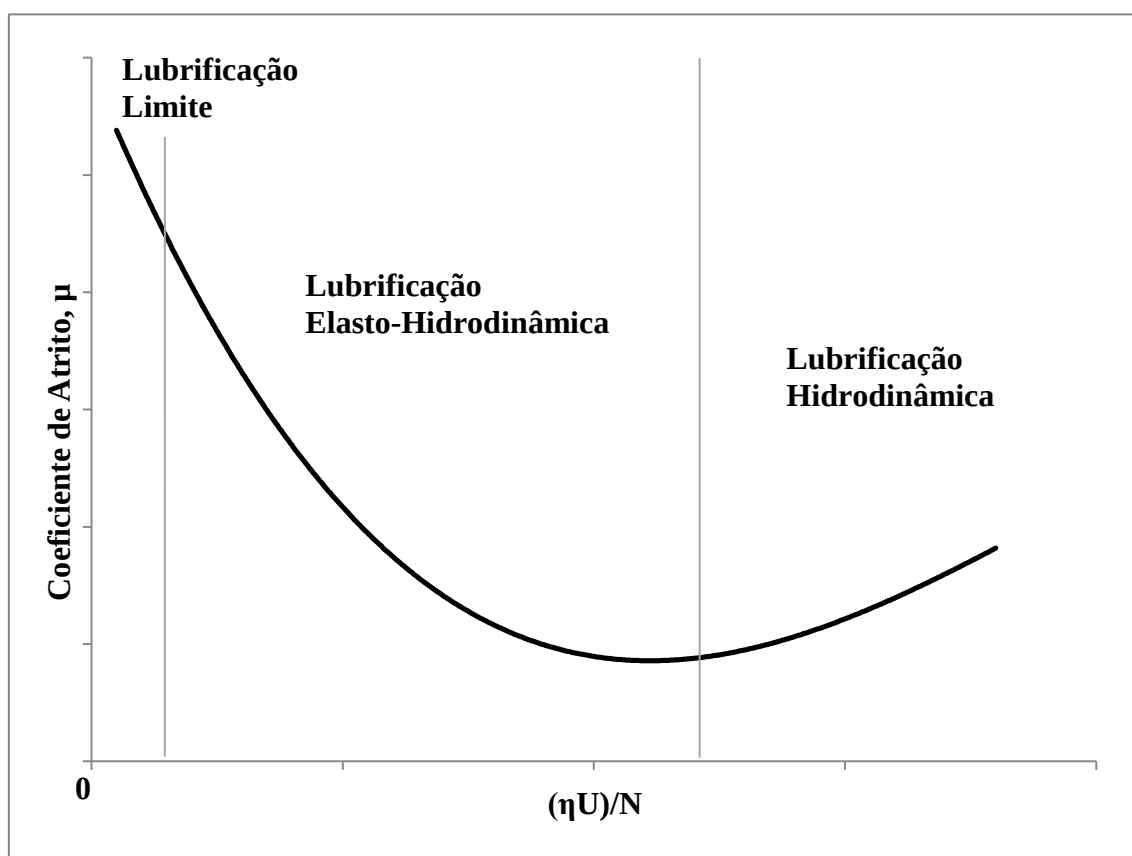


Figura 2.2: Curva de Stribeck teórica. Onde: η = Viscosidade do fluido; U = Velocidade de deslizamento e N = Carga Normal (HUTCHINGS, 1992).

Como pôde ser visto na Figura 2.2, quando a relação aproxima-se do zero, há uma mudança no regime de lubrificação, passando para o regime de lubrificação limite.

Em vários sistemas mecânicos, por exemplo, nos pistões de motores de combustão interna, o movimento entre os corpos se dá de forma recíproca, onde estão presentes os regimes de lubrificação hidrodinâmica, elasto-hidrodinâmica, e limite.

A Figura 2.3 ilustra o movimento de um pistão, juntamente com os regimes de lubrificação presentes no conjunto.

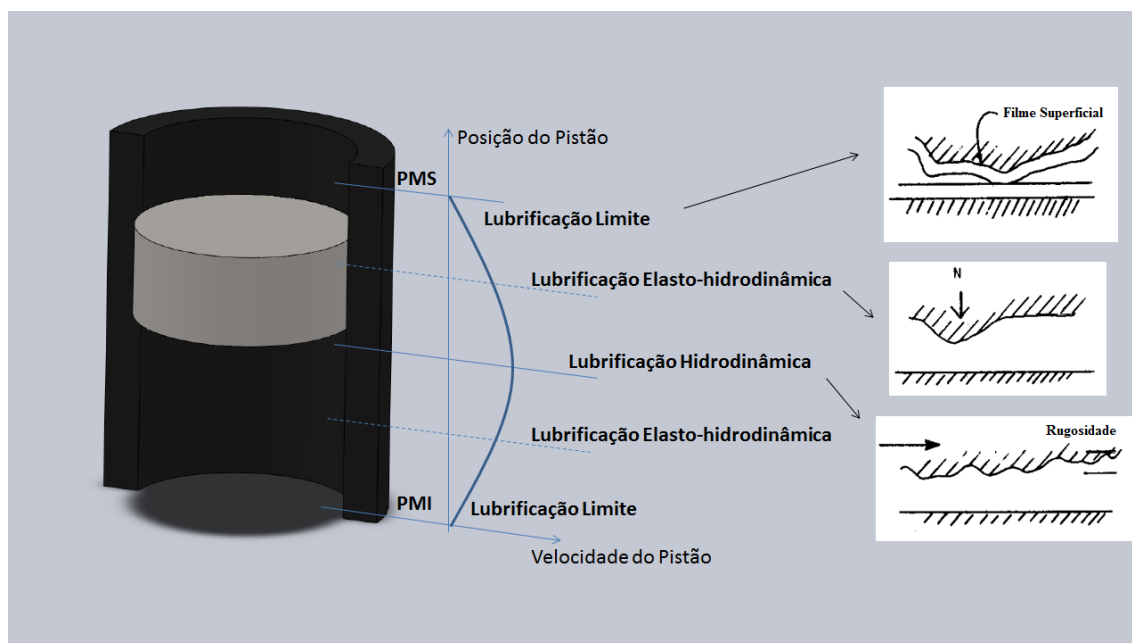


Figura 2.3: Ilustração dos regimes de lubrificação em função do movimento do pistão.

Diante disso, torna-se necessária a adição de outro tipo de lubrificante, que neste caso é um lubrificante sólido adicionado no volume do material. Trata-se de uma tentativa de formar um tribofilme sobre as asperidades em contato, a fim de diminuir o coeficiente de atrito e consequentemente o desgaste.

Com o advento da técnica de metalurgia do pó, utilizada na fabricação de materiais sinterizados, torna-se viável a produção de novos materiais, pois permite que o lubrificante sólido seja incorporado ao volume da matriz na etapa de mistura do pó (BINDER, 2009).

A elevada porosidade dos componentes sinterizados leva à redução da resistência mecânica e capacidade de carga, quando comparado com materiais totalmente densos. No entanto, eles têm o potencial de armazenar lubrificantes que podem ser liberados durante a utilização do componente (DE MELLO et al., 2001; DE MELLO; HUTCHINGS, 2001a). Além disso, os poros podem eventualmente desempenhar um papel importante na remoção de detritos de desgaste das superfícies em contato, tal como sugerido por alguns autores (DUBRUJEAUD; VARDAMOULIAS; JEANDIN, 1994; AHN; KIM; LIM, 1997; DA

SILVA; BINDER; DE MELLO, 2005). De fato, tal como outras propriedades tribológicas, o comportamento tribológico é fortemente ditado pelo sistema tribológico imposto, como dito anteriormente, em alguns casos os poros podem ser úteis, porém em outros casos, podem ser prejudiciais para o comportamento tribológico (DUBRUJEAUD; VARDAMOULIAS; JEANDIN, 1994; CHEN; LI; COOK, 2009).

Para o desenvolvimento de materiais compósitos de matriz metálica, a metalurgia do pó é uma técnica atrativa e competitiva, devido ao seu baixo custo quando aplicada em larga escala, ou seja, produção de grandes volumes, e também por sua grande versatilidade na adequação da técnica para aplicar e adaptar a microestrutura de acordo com as exigências de cada aplicação. Para se ter um elevado desempenho mecânico e tribológico, necessita-se da combinação de propriedades mecânicas e parâmetros estruturais da matriz, tais como o grau de continuidade da matriz metálica, a quantidade de lubrificante sólido adicionado ao material, do tamanho e da forma das partículas de lubrificante sólido (SCHROEDER et al., 2013). Além disso, os processos de metalurgia do pó são muito vantajosos devido à possibilidade de dar forma a peças complexas e até mesmo para componentes de pequeno porte, os quais estão sendo cada vez mais necessários, devido à tendência de miniaturização dos sistemas mecânicos modernos (HAMMES et al., 2013).

Segundo (HAMMES et al., 2013), basicamente a rota de processamento por metalurgia do pó consiste em, pelo menos, três etapas principais:

- Seleção e preparação da mistura dos pós;
- Compactação da mistura;
- Sinterização a altas temperaturas, em que as propriedades finais do compósito são atingidas.

Os três passos são extremamente importantes e devem ser cuidadosamente controlados durante a produção de materiais compósitos autolubrificantes de alto desempenho. A elevada porosidade dos componentes sinterizados leva à redução da resistência mecânica e da capacidade de carga, quando comparado com materiais totalmente densos (DE MELLO et al., 2001; DE MELLO; HUTCHINGS, 2001a).

Sabe-se que o desenvolvimento de materiais compósitos de alta qualidade exige uma maior resistência mecânica. Continuamente, procuram-se novas alternativas e mecanismos para melhorar a resistência mecânica e suporte de carga. De acordo com (GERMAN, 2005), reduções de 2 a 3% da porosidade nestes materiais, resultaria em um aumento de até 20% em

sua resistência mecânica. Por exemplo, um aço sinterizado tratado termicamente com 13,5% de porosidade, possui uma resistência à tração que é apenas 57% da resistência à tração do mesmo aço totalmente denso (GERMAN; PARK, 2009).

Diversas técnicas de compactação, como prensagem uniaxial de ação simples, extrusão, laminação e moldagem de pós por injeção têm de ser consideradas, em função da geometria e das propriedades desejadas para o material compósito.

Os parâmetros do processo de metalurgia do pó afetam significativamente a topografia de superfície, principalmente o tamanho do grão de pó (DE MELLO; HUTCHINGS, 2001b). Uma baixa porosidade sempre está relacionada com uma maior pressão de compactação e um maior tamanho do grão de pó (DE MELLO, 2005). Componentes autolubrificantes têm sido utilizados por várias décadas em equipamentos para casa e escritório, tais como impressoras, máquinas de barbear, furadeiras, liquidificadores entre outros (DE MELLO et al., 2011).

Matrizes metálicas de ligas à base de cobre, ferro e níquel são os materiais mais comumente utilizados. Lubrificantes sólidos tais como MoS_2 , WS_2 , MoSe_2 , hBN, metais de baixo ponto de fusão, tais como a prata, o estanho e o chumbo, bem como a grafite são os lubrificantes sólidos mais utilizados (DANGSHENG, 2001; KATO et al., 2003; DONNET; ERDEMIR, 2004; PAULEAU; THIÈRY, 2004; ERDEMIR, 2005). A maioria dos compostos desenvolvidos no passado contém uma elevada porcentagem de partículas de lubrificante sólido (de 15 a 40%) a fim de se obter um baixo coeficiente de atrito. Isso resulta em uma matriz metálica amplamente descontínua, que apresenta propriedades mecânicas pobres (BINDER et al., 2010).

A Figura 2.4 apresenta um desenho esquemático de uma microestrutura ideal para um compósito autolubrificante. Este deve consistir em uma matriz contínua contendo partículas de lubrificantes sólidos dispersas regularmente a fim de proporcionar uma área ativa a ser coberta por cada uma delas.

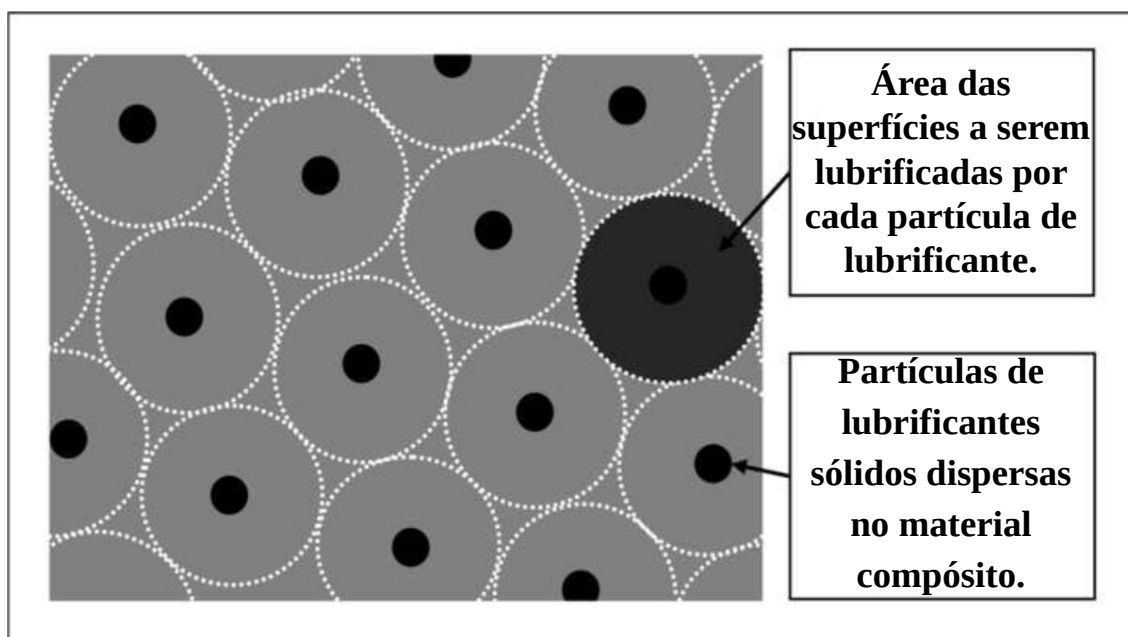


Figura 2.4: Modelo microestrutural de um compósito autolubrificante ideal (BINDER et al., 2010).

Compósitos autolubrificantes têm estado disponíveis há muito tempo e são extensivamente utilizados pela indústria na tentativa de reduzir o atrito e o desgaste em uma variedade de mancais rotativos, de deslizamento e rolamento (ERDEMIR, 2001).

Nos últimos anos, compósitos autolubrificantes têm sido estudados em diversas aplicações. Sendo assim, a produção de compósitos autolubrificantes contendo partículas de segunda fase incorporadas no volume dos materiais parece ser uma solução promissora (DONNET; ERDEMIR, 2004; PAULEAU; THIÈRY, 2004; ERDEMIR, 2005).

Existem duas maneiras para dispersar as partículas de lubrificante sólido no volume de uma matriz metálica, a fim de obter um composto sinterizado autolubrificante. A primeira é por geração “in situ” de partículas de fase de lubrificante sólido, durante a sinterização através da dissociação de um precursor misturado aos pós metálicos. Já a segunda dispersão é através da mistura de pós de lubrificante sólido, com pós metálicos por um processo de mistura simples (BINDER et al., 2008; KLEIN et al., 2009).

Recentemente, (BINDER et al., 2010) apresentaram o efeito da quantidade de precursor e da temperatura de sinterização na durabilidade e no coeficiente de atrito de novos aços autolubrificantes produzidos pelo processo de moldagem de pós por injeção (MPI), o recente processo de extração e sinterização assistida por plasma (PADS) e a formação “in situ” de partículas de lubrificantes sólidos. Neste caso, a formação “in situ” de nódulos de

grafite no volume dos aços sinterizados foi obtida durante a sinterização, simplesmente pela dissociação das partículas de carbeto de silício (SiC) misturadas com os pós metálicos da matriz anteriormente à injeção.

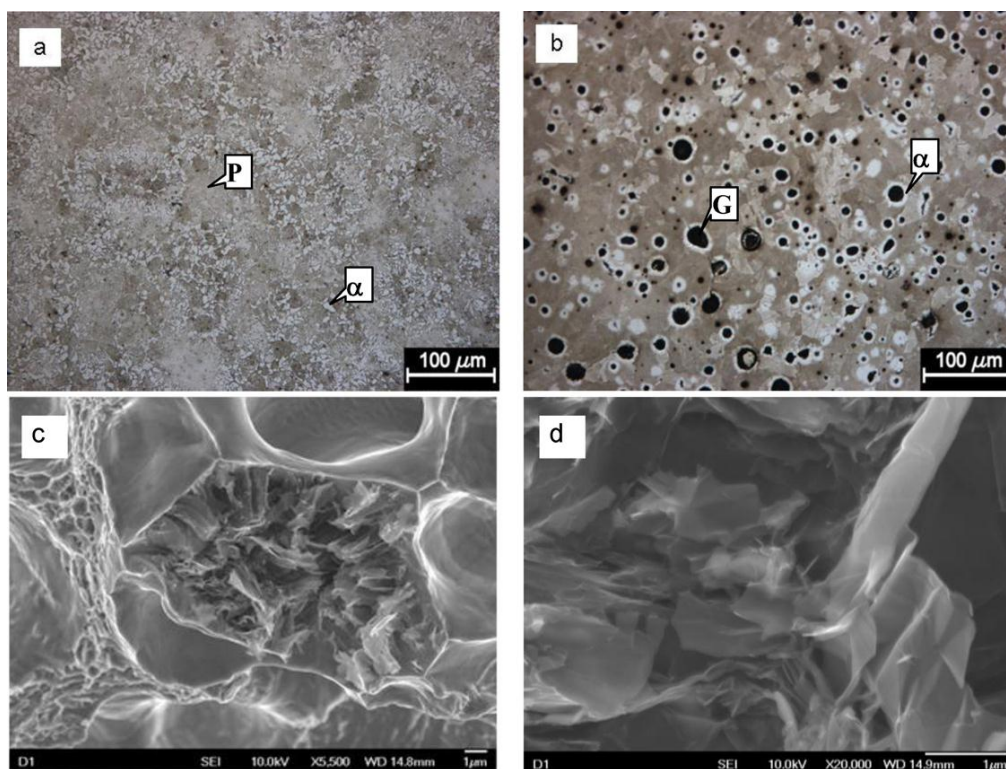


Figura 2.5: Aspectos típicos da microestrutura. Liga Fe +0,6%C +4%Ni. (a) matriz metálica, (b), adicionados 2% de SiC, (c) nódulo de grafite, (d) camada de grafite (DE MELLO et al., 2013b).

São mostrados na Figura 2.5 aspectos típicos das microestruturas. A liga de referência mostrada na Figura 2.5-a apresenta uma microestrutura constituída de perlita (P) + ferrita (α), ao passo que a adição de SiC aos pós da matéria-prima induz à formação dos nódulos de grafite. Os nódulos de grafite (G) são sempre circundados por anéis de ferrita (α), e são mostrados na Figura 2.5-b. Tal formação de microestrutura era esperada com base em considerações termodinâmicas e sua evolução depende do tempo e da temperatura de sinterização, bem como da quantidade de SiC. O carbono remanescente forma nódulos de grafite (tamanho $\leq 20 \mu\text{m}$) apresentando uma nanoestrutura de camadas de grafite empilhadas de alguns décimos de nanômetros de espessura, mostradas na Figura 2.5-c (obtida através de uma superfície de uma fratura criogênica) e na Figura 2.5-d (DE MELLO et al., 2013b).

A influência do teor de precursor e da temperatura de sinterização no comportamento tribológico é sintetizada na Figura 2.6.

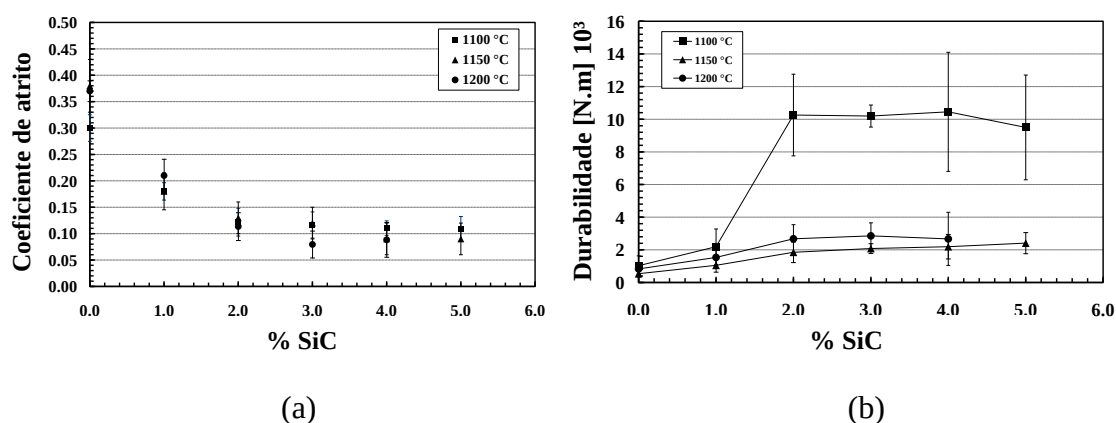


Figura 2.6: Efeito do teor de SiC e da temperatura de sinterização no comportamento tribológico. (a) coeficiente de atrito; (b) durabilidade (DE MELLO et al., 2013b).

Independentemente da temperatura de sinterização, o aumento do teor do precursor e, como consequência, o número de nódulos de grafite, produziu uma redução do coeficiente de atrito médio. Em geral, a redução foi significativa para até 3% de SiC. Para maiores quantidades de SiC, o coeficiente de atrito ficou quase constante.

É razoável supor que folhas de grafite são removidas a partir dos nódulos de grafite gerados “in situ” e permanecem na interface contribuindo, assim, para a formação de uma tribocamada protetora. Devido ao tamanho pequeno dos pós, o caminho livre médio entre nódulos de grafite também é pequeno e a “cobertura” completa da superfície entre os nódulos é facilmente alcançável. Como consequência, o número de folhas de grafite gerados nas ligas que contêm mais do que 3% de SiC é suficiente para produzir a camada de proteção e os baixos coeficientes de atrito (DE MELLO et al., 2013b).

Por outro lado, uma vez que as tribocamadas também degradam-se sob a ação do deslizamento, para a durabilidade da tribocamada o efeito de saturação é atingido a 2% de SiC, indicando que a auto reposição fornecida pelos nódulos de grafite é já ativa neste valor. A região central da marca de desgaste foi feita uma análise via espectroscopia Micro Raman e apresentou claramente uma banda G alargada (associada com a hibridação sp^2) e uma banda D (associada com a desordem cristalina).

O alargamento das bandas, a razão ID/IG, o tamanho dos cristais de grafite, a forma e a posição da banda de segunda ordem G' são, de acordo com a literatura (DE MELLO et al., 2011), evidências claras de desordem no material. Eles também são uma forte indicação da presença da chamada grafite 2D turboestrática que apresenta distâncias interlamelares mais longas do que a grafite 3D altamente orientada. O aumento da distância pode induzir uma

baixa interação entre estes planos atômicos e é, provavelmente, a origem do baixo coeficiente de atrito (DE MELLO et al., 2013b).

É possível observar que não há quase nenhum efeito da temperatura de sinterização no coeficiente de atrito médio. Pelo contrário, a temperatura de sinterização influencia fortemente na durabilidade. A baixa temperatura de sinterização induz significativamente na maior durabilidade (5x).

Verificou-se, ainda, nenhuma correlação associando o coeficiente de atrito e a durabilidade, com as propriedades mecânicas das ligas (DE MELLO et al., 2011).

A fim de compreender melhor porque a baixa temperatura de sinterização apresentou uma maior durabilidade, as amostras sinterizadas a 1100 °C foram criogenicamente fraturadas e, em seguida, as superfícies foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura. A análise revelou a presença de partículas de SiC parcialmente dissolvidas no interior de nódulos de grafite. Levando-se em conta que a matriz metálica é contínua, é razoável supor que o lubrificante sólido, ou seu precursor, não contribui para a resistência mecânica do compósito. No entanto, a presença de partículas não dissolvidas de SiC pode produzir uma maior capacidade de suporte de carga e a proteção da matriz/tribocamada, induzindo, assim, uma maior durabilidade (DE MELLO et al., 2013b).

A adição de elementos de liga para os compósitos produziu diferentes matrizes. Todas as três microestruturas têm em comum a presença de nódulos de grafite, induzidos pela adição de SiC à matéria-prima em pó, enquanto que a matriz metálica varia de ferrita para martensita. A liga de referência (Fe+0,6%C) apresentou uma matriz constituída principalmente de ferrita (estabilizado pelo Silício), com uma fração pequena de perlita. A adição de níquel não alterou substancialmente os constituintes microestruturais. Para a liga contendo Ni+Mo, os constituintes metalúrgicos mudaram de ferrita/perlita para martensita (DE MELLO et al., 2013b).

A influência da matriz metálica sobre o coeficiente de atrito no regime permanente é sintetizada na Figura 2.7.

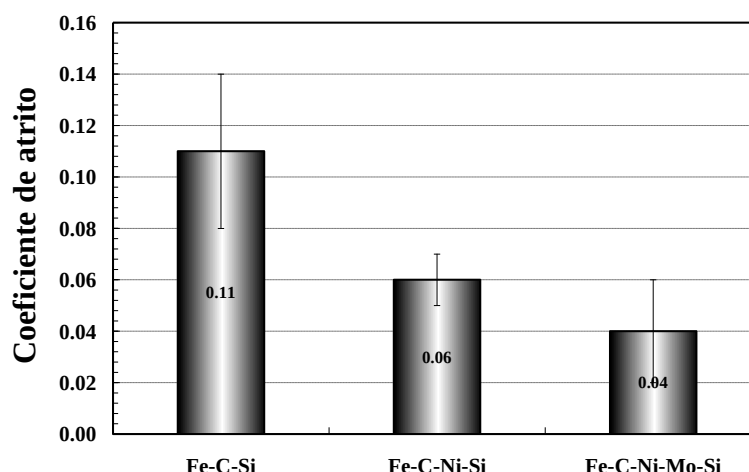


Figura 2.7: Coeficiente de atrito (DE MELLO et al., 2013b).

A adição de elementos de liga reduziu consideravelmente o coeficiente de atrito (redução de 45% para as ligas com Ni) e valores tão baixos como 0,04 foram apresentados pelos aços C-Fe-Ni-Mo (65% de redução).

As marcas de desgaste das amostras apresentaram diferentes larguras e o aspecto geral da marca de desgaste também variou. Dentro da marca de desgaste, houve uma evidência clara de desgaste abrasivo, tal como evidenciado pela presença de vários riscos paralelos (DE MELLO et al., 2013a). A intensidade e o número de riscos variaram de acordo com o material. A taxa de desgaste dos contra corpos apresentaram o mesmo comportamento que a dos espécimes (DE MELLO et al., 2013b). A taxa de desgaste dos espécimes e dos contra corpos estão resumidas na Figura 2.8.

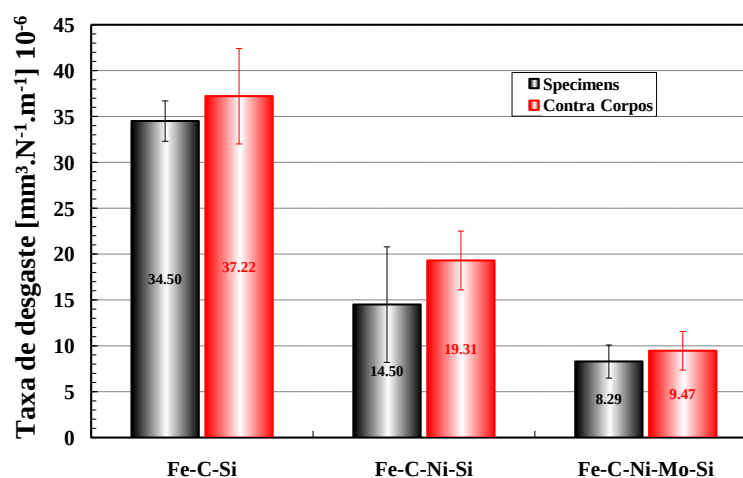


Figura 2.8: Taxa de desgaste dos aços autolubrificantes e das esferas de aço AISI 52100 (DE MELLO et al., 2013b).

As menores taxas de desgaste foram apresentadas pelas amostras que contêm elementos de liga. Estas reduções no coeficiente de atrito e no desgaste do par tribológico podem estar associadas com os efeitos de transferência da tribocamada do aço autolubrificante para a esfera, e vice-versa e, assim, evitando continuamente o contato de metal com metal e foram associadas à resistência da matriz metálica à deformação plástica e, consequentemente, para a vedação dos reservatórios de lubrificante (DE MELLO et al., 2013a).

As Figuras 2.9-a e 2.9-b apresentam os espectros dominantes encontrados na marca de desgaste da liga de Fe-Ni-C-Mo. Todos os espectros mostram claramente a presença das chamadas grafite 2D turboestráticas conforme evidenciadas pela banda G tipicamente alargada e a presença de uma banda D, o que está associado com o distúrbio da cristalinidade. Também é notável que os espectros das tribocamadas apresentados nas marcas de desgaste dos espécimes ou nos contra corpos são quase idênticos, indicando a presença benéfica da grafite 2D turboestrática em ambos os lados do par tribológico (DE MELLO et al., 2013b).

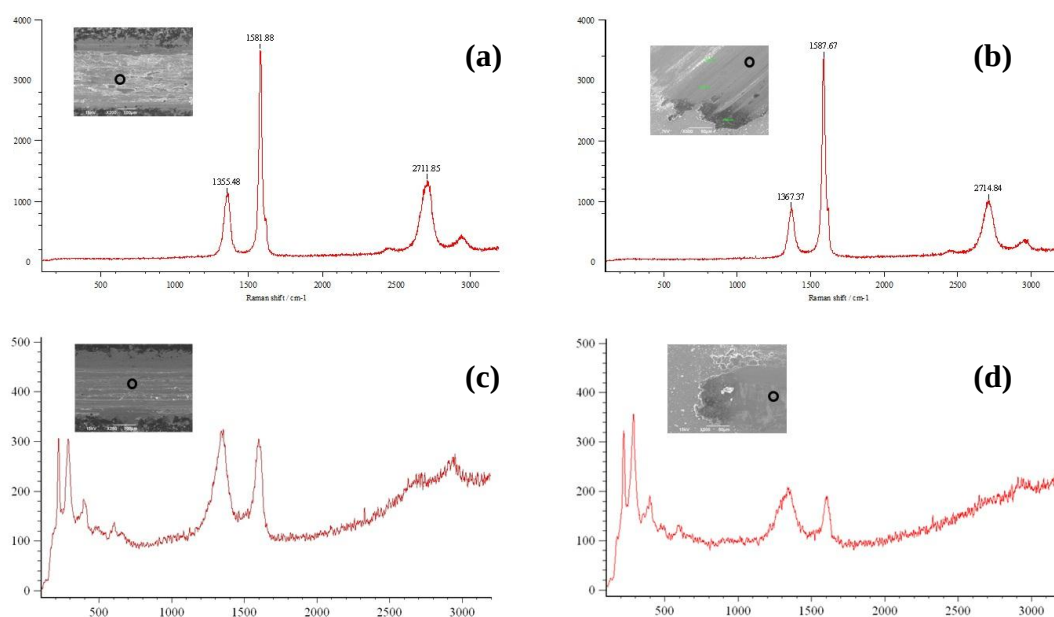


Figura 2.9: Típicos espectros Raman. (a) espécime C-Fe-Ni-Mo; (b) contra corpo C-Fe-Ni-Mo; (c) espécime Fe-C, centro da marca de desgaste; (d) contra corpo Fe-C, centro da marca de desgaste (DE MELLO et al., 2013b).

Pelo contrário, os espectros encontrados na marca de desgaste da liga de referência, variaram de acordo com a sua posição na marca de desgaste. Espectros semelhantes aos encontrados no caso anterior foram mensurados perto das bordas das marcas de desgaste,

enquanto que aqueles encontrados no centro da marca foram um pouco diferentes, mostrados pelas Figuras 2.9-c e 2.9-d. Apesar de apresentarem as menores intensidades das bandas características de grafite 2D e uma certa quantidade de fluorescência, os espectros também apresentaram outras bandas menores a frequências mais baixas. A origem destas bandas foi atribuída por (DE MELLO et al., 2009) para a formação de óxido de ferro, por reações triboquímicas causadas pelo ambiente circundante e é, provavelmente, uma consequência da elevada disponibilidade de energia relacionada com coeficientes de atrito elevados. É razoável supor que a presença de óxidos de ferro associados com as menores intensidades da fase grafítica induz a um susceptível desempenho tribológico inferior (DE MELLO et al., 2013b).

Recentemente (HAMMES et al., 2013; SCHROEDER et al., 2013) estudaram o comportamento tribológico de ligas autolubrificantes a seco. A composição da matriz foi baseada numa liga de Fe-1.5Mo-1.0Si-0.8C, enquanto que os lubrificantes sólidos foram hBN e grafite (2,5% e 5% em peso respectivamente) misturados aos pós metálicos por um processo de mistura simples. O objetivo de usar dois lubrificantes sólidos está associado ao seu comportamento tribológico em ambientes diferentes: o grafite é muito conhecido por seu melhor efeito de lubrificação em ambientes úmidos enquanto o hBN é adequado para aplicações de alta temperatura (LIPP; SCHWETZ; HUNOLD, 1989; LANCASTER, 1990).

Os compostos foram produzidos com diferentes compactações, onde estes foram compactados a 500 MPa, 700 MPa e com dupla sinterização e compactação a 500 e 700 MPa. A resistência à tração destes materiais foi analisada e é mostrada na Figura 2.10. Nota-se que o aumento na pressão de compactação para 700 MPa produziu um aumento de cerca de 20% na resistência à tração, enquanto que para a dupla compactação e sinterização este aumento chegou a cerca de 80% (SCHROEDER et al., 2013).

Os testes de deslizamento foram realizados no modo alternativo com amplitude de 5 mm e frequência de 2 Hz. Primeiramente, com carga constante de 15 N durante 60 minutos. Posteriormente, foram realizados testes de durabilidade com incrementos de 7N a cada 10min. Como contra corpo foram utilizadas esferas de aço AISI 52100 com 10 mm de diâmetro (HAMMES et al., 2013).

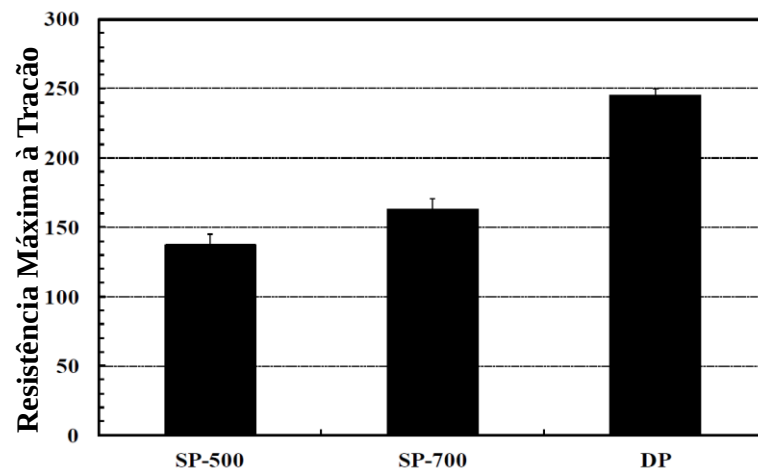
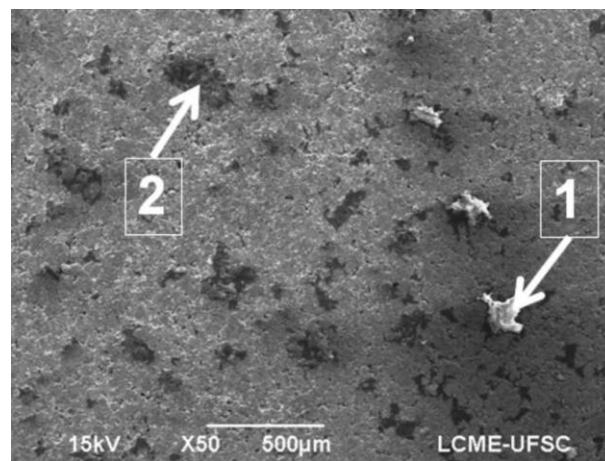
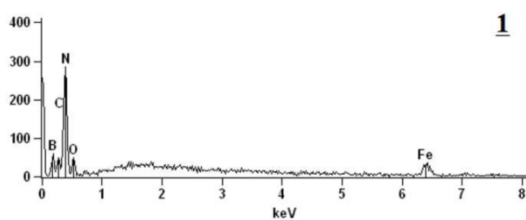


Figura 2.10: Resistência Máxima à Tração (SCHROEDER et al., 2013).

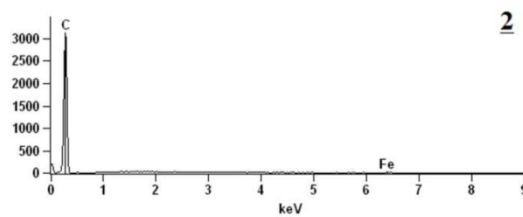
Análises por MEV não revelaram diferenças significativas entre as superfícies das amostras. O aspecto característico das superfícies é ilustrado na Figura 2.11. A imagem mostra as presenças dos elementos Boro, Nitrogênio e Carbono, indicando que seja dois diferentes tipos de reservatórios de lubrificantes sólidos regularmente distribuídos na estrutura do material (HAMMES et al., 2013).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.11: Aspecto da superfície da amostra compactada a 700 MPa. (a) Imagem gerada por MEV por elétrons retroespalhados; (b) análise por EDS do ponto 1; (b) análise por EDS do ponto 2 (HAMMES et al., 2013).

Para os testes efetuados com carga constante, não houve diferença significativa no coeficiente de atrito. A Figura 2.12 mostra a evolução deste ao longo do teste.

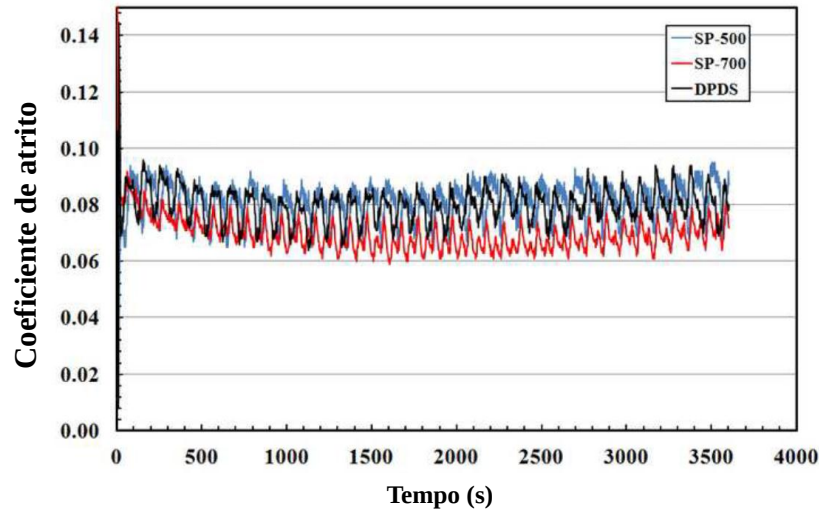


Figura 2.12: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio (HAMMES et al., 2013).

A taxa de desgaste das amostras e do contra corpo é mostrada nas Figuras 2.13-a e 2.13-b respectivamente. Nota-se que a taxa de desgaste do contra corpo é cerca de 4x maior que das amostras, sugerindo a presença de um componente triboquímico (SCHROEDER et al., 2013).

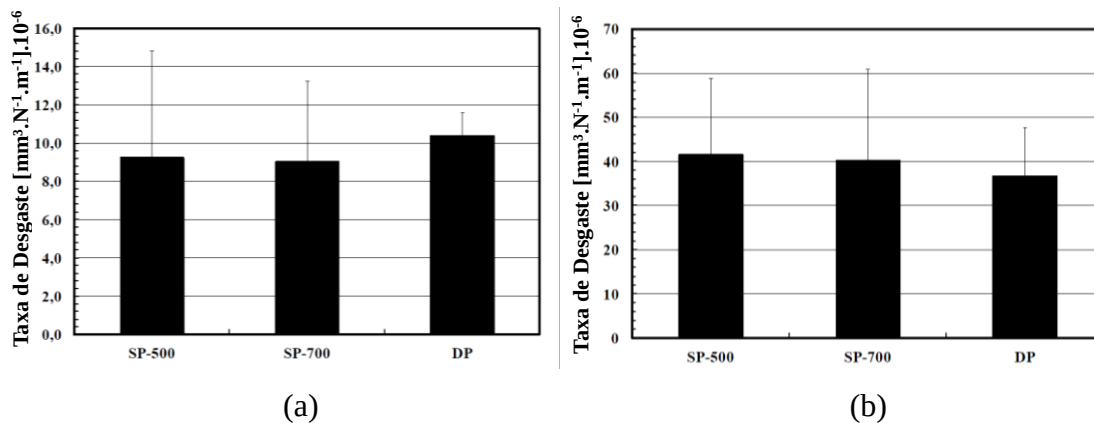


Figura 2.13: Taxa de desgaste. (a) Amostras; (b) Contra corpos (SCHROEDER et al., 2013).

A Figura 2.14 ilustra a marca de desgaste produzida na amostra compactada a 500 MPa, onde se nota que há reservatórios ativos de lubrificantes sólidos mesmo após o ensaio, mostrados pelas setas brancas. Isso, em princípio, garantiria o reabastecimento de lubrificantes sólidos no contato, mantendo o sistema lubrificado (SCHROEDER et al., 2013).

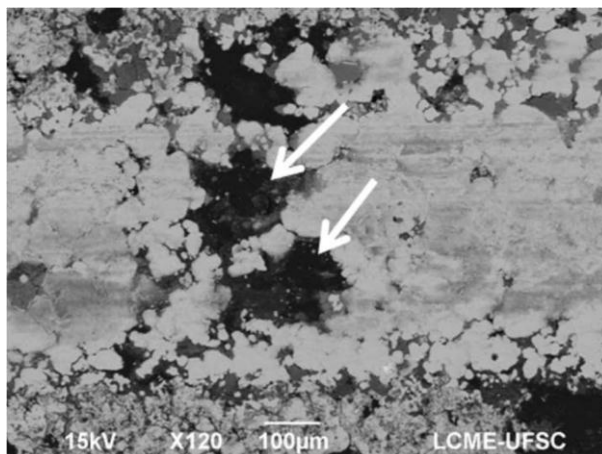


Figura 2.14: Mecanismo de desgaste típico. MEV. Amostra SP-500 (SCHROEDER et al., 2013).

A Figura 2.15 mostra a formação de uma tribocamada apresentada em quase todas as marcas de desgaste, indicada pela região cinzenta. De acordo com (JACOBSON; HOGMARK, 2009), esta é uma característica de qualquer contato lubrificado a seco ou com lubrificação limite e provavelmente explica o desempenho tribológico resultante de tais sistemas tribológicos.

Análises via EDS (Figuras 2.15-b e 2.15-c), mostram claramente uma forte presença de oxigênio e carbono para a região 1, quando comparada com a superfície não desgastada (região 2).

A Figura 2.16 exibe o aspecto típico das marcas de desgaste apresentadas pelos contra corpos. O aspecto geral de todas as marcas de desgaste foi bastante semelhante e apresentou uma tribocamada característica. Também é notável a presença de um possível fluxo de material ou de transferência de material proveniente do corpo na extremidade da pista de desgaste. Análises via EDS, Figuras 2.16-b e 2.16-c, indicam picos de carbono e oxigênio na tribocamada (região 1), enquanto picos de ferro e cromo foram observados na superfície sem desgaste do aço AISI 52100 representada pela região 2 (HAMMES et al., 2013).

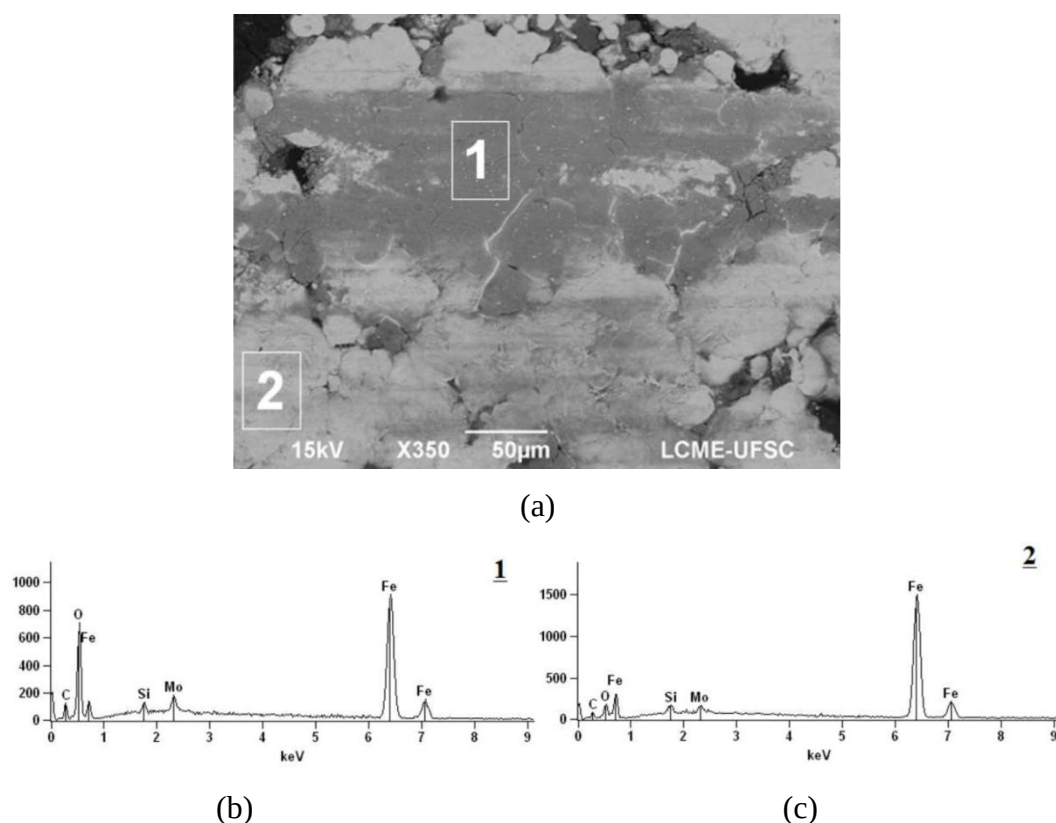


Figura 2.15: Mecanismo de desgaste típico. MEV. (a) Amostra SP-700; (b) análise via EDS para a região 1; (c) análise via EDS para a região 2 (HAMMES et al., 2013).

A formação de uma tribocamada sobre as superfícies deslizantes parece ser a chave para a realização do baixo atrito e longa vida útil na maioria dos contatos lubrificados por lubrificantes sólidos (DE MELLO et al., 2009). Inicialmente, constatou-se que as tribocamadas não estavam presentes, mas foram formadas como um resultado do desgaste da superfície e da deformação do substrato. Estes filmes foram continuamente reabastecidos por partículas de grafite dispersas na matriz metálica (ROHATGI; RAY; LIU, 1992).

A durabilidade das ligas é visualizada na Figura 2.17. É possível observar que o efeito da compactação tem uma forte influência sobre a durabilidade. O aumento da pressão de compactação produziu um aumento de cerca de 40% na durabilidade, enquanto a dupla compactação e sinterização aumentou a durabilidade em cerca de 130% (SCHROEDER et al., 2013).

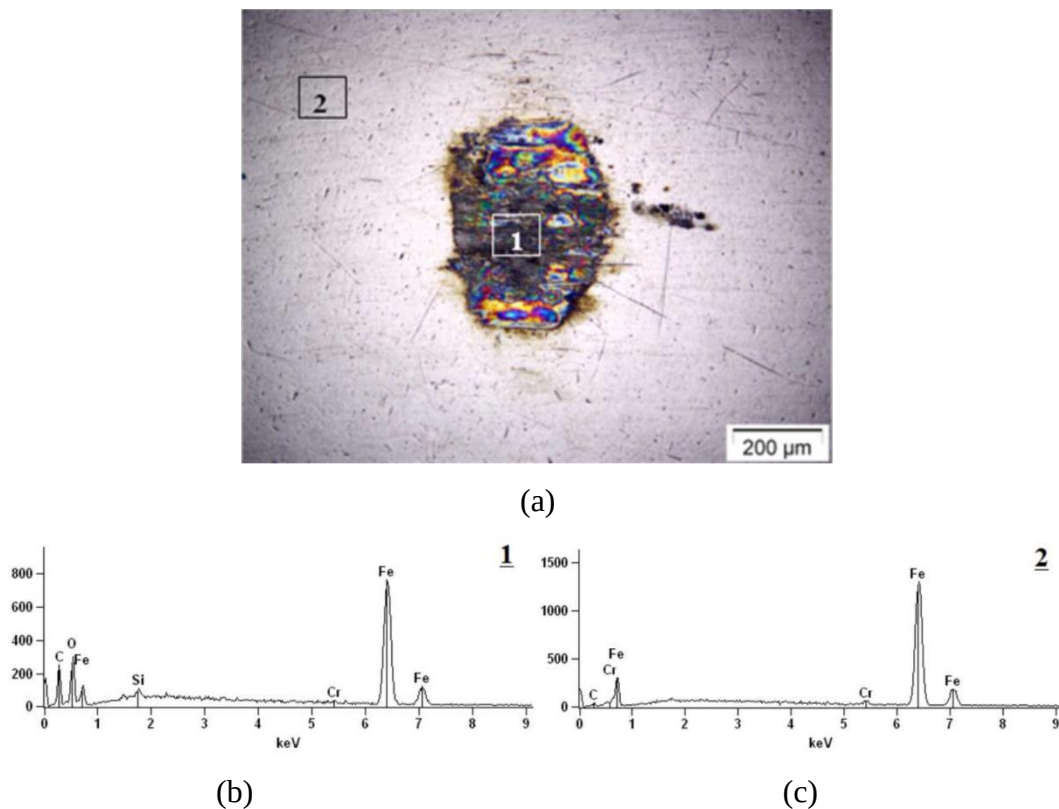


Figura 2.16: Mecanismo de desgaste típico. (a) Imagem do contra corpo gerada por MEV por elétrons retroespalhados; (b) análise via EDS para a região 1; (b) análise via EDS para a região 2 (HAMMES et al., 2013).

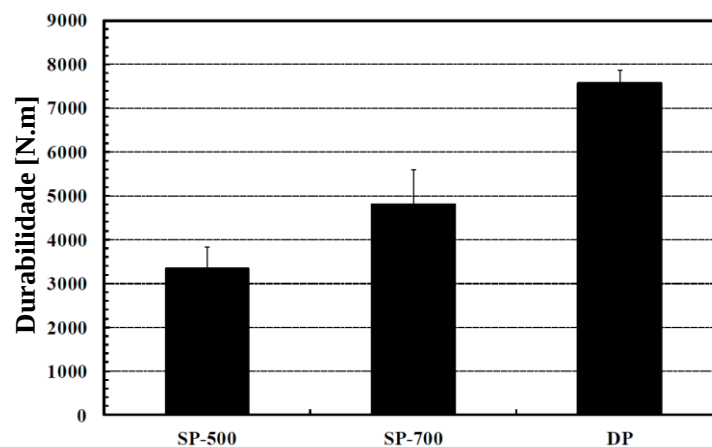


Figura 2.17: Durabilidade dos compostos testados (SCHROEDER et al., 2013).

A fim de entender melhor a maior durabilidade associada com a dupla compactação, seções transversais das amostras foram analisadas. As Figuras 2.18-a e 2.18-b mostram cortes transversais de amostras produzidas por técnicas de prensagem simples e duplas. Nota-se grande diferença na porosidade, na verdade, uma das principais características impostas pela dupla prensagem é a diminuição desta (SCHROEDER et al., 2013).

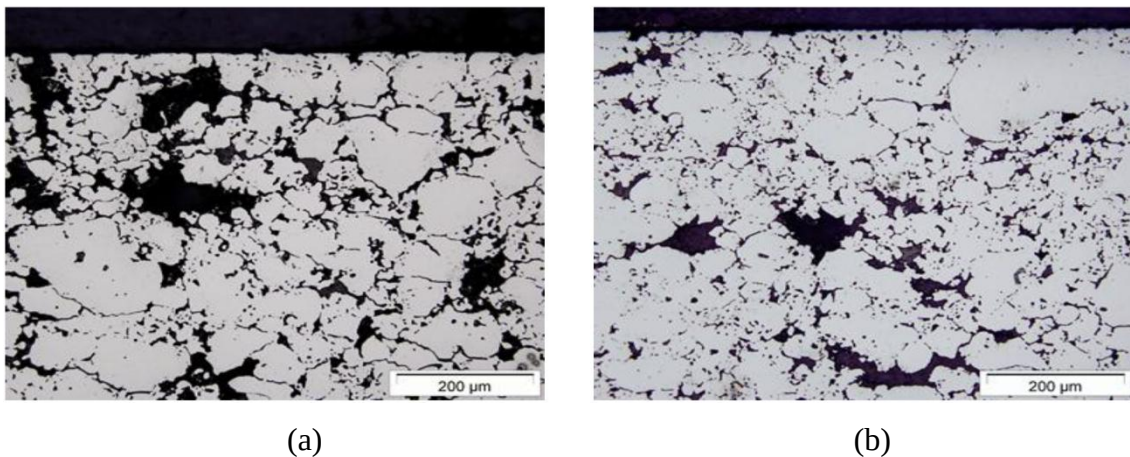


Figura 2.18: Cortes transversais. MEV. (a) SP-500; (b) DP (SCHROEDER et al., 2013).

Por último, na Figura 2.19, verifica-se que a dupla compactação reduz a porosidade em cerca de 10% quando comparada com a amostra SP-700 e em cerca de 30% quando comparada com a amostra SP-500. Esta diminuição da porosidade provavelmente influenciou no aumento da resistência máxima à tração e da durabilidade. Estes últimos dados foram mostrados de maneira individual anteriormente, nas Figuras 2.10 e 2.17, respectivamente.

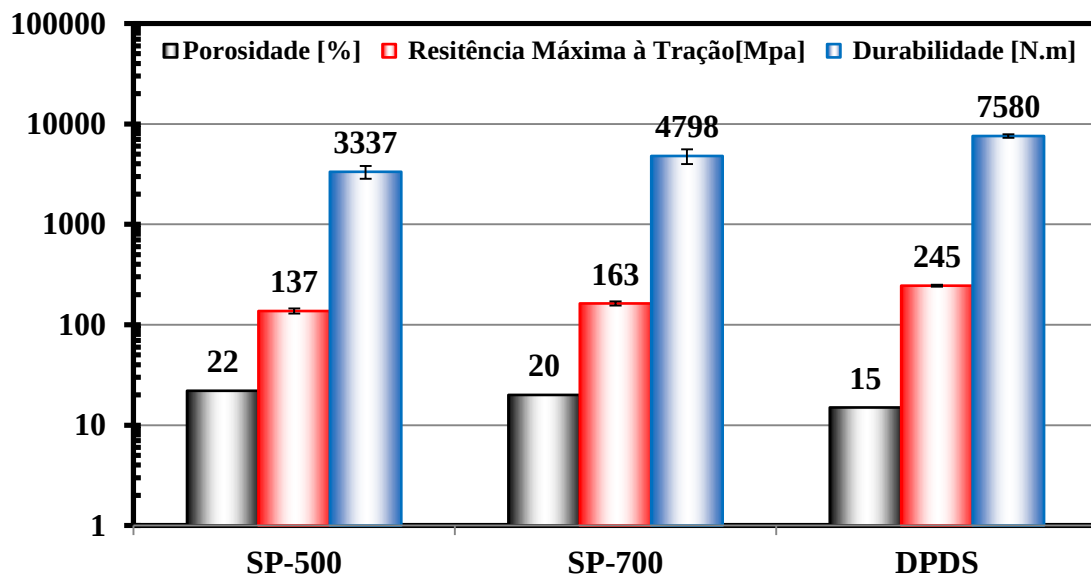


Figura 2.19: Efeito da técnica de compactação na porosidade (SCHROEDER et al., 2013).

Portanto, este trabalho visa estudar 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 adição de um lubrificante líquido em regime de lubrificação conjunta em uma configuração de desgaste por deslizamento alternado.

CAPÍTULO III

Metodologia

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

3.1 - Materiais

As amostras foram fabricadas a partir da metalurgia do pó sendo prensadas a 500 Mpa, as quais foram posteriormente sinterizadas em forno assistido por plasma a 1125°C, por 60 minutos em atmosfera Argônio-Hidrogênio. As tabelas 3.1 e 3.2 mostram, respectivamente, a composição química das amostras sinterizadas e dos pós utilizados na sua fabricação.

Tabela 3.1: Composição química das amostras sinterizadas.

Liga	Nome	Elementos de Liga				Lubrificantes	
		Fe	C (%)	Si (%)	Mo (%)	Grafita (%)	hBN (%)
Auto lubrificante	C	Bal.	0.6	1	-	2.5	5
	P	Bal.	0.8	1	1.4	2.5	5
Matriz	CM	Bal.	0.6	1	-	-	-
	PM	Bal.	0.8	1	1.4	-	-

Tabela 3.2: Pós utilizados na confecção das amostras sinterizadas.

Pós Utilizados					
Liga	Fe	C	Si	Grafita (%)	hBN (%)
C	Hoganas AHC 100.29	Nacional Grafite Micrograf 99511 UJ	Sandvik Fe45Si d90:22 µm	Nacional Grafite Micrograf 99545 HP	Momentive AC 6028
P	Hoganas Astaloy Mo				

Os lubrificantes sólidos foram adicionados na mistura de pós da matriz metálica das amostras autolubrificantes.

3.2 – Ensaio de Microdureza

Para a medição da microdureza, usou-se o método de Microdureza Vickers com carga de 200 gramas. Foram feitas dez medições para cada amostra. Os ensaios foram realizados em um microdurômetro Shimadzu modelo HMV Micro Hardness Tester.

3.3 – Caracterização tribológica

Visando entender o comportamento tribológico das ligas autolubrificantes trabalhando juntamente com lubrificação fluida, foram realizados testes:

- i. Secos – Ligas Matriz
- ii. Secos – Ligas Auto lubrificantes
- iii. Lubrificados – Ligas Matriz
- iv. Lubrificados – Ligas Auto lubrificantes

Os ensaios de deslizamento foram efetuados em um Tribômetro Universal Plint[®], modelo TE 67 Plint and Partners LDT no modo alternativo com amplitude de 5 mm e frequência de 2 Hz. Este tribômetro possui uma célula de carga para a medição da força de atrito, um sistema de medição do potencial de contato, viabilizando a percepção da formação ou não de uma camada isolante entre o corpo e o contra corpo durante o ensaio. Foi incorporado ao tribômetro um sensor LVDT, 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 mostra a disposição das partes do tribômetro.

A aquisição de dados foi feita por uma placa de aquisição ligada a um microcomputador com o software LabVIEW, onde foi implementado um programa de aquisição de dados para adquirir os sinais da célula de carga, do LVDT e também do potencial de contato.

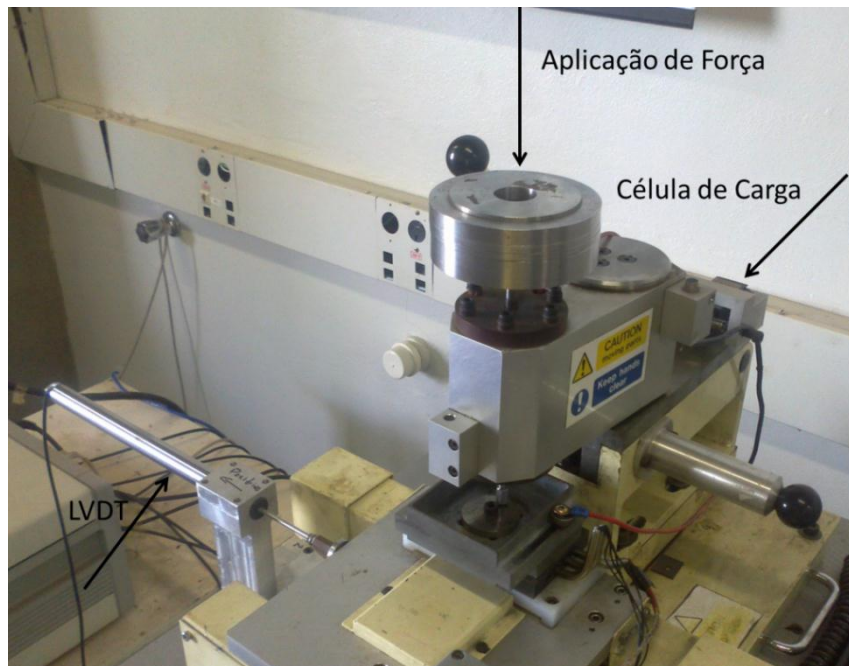


Figura 3.1: Ilustração do Tribômetro Plint TE67 utilizado nos ensaios.

A análise dos dados foi feita utilizando-se de uma técnica denominada triboscopia, que consiste fundamentalmente na produção de imagens numéricas de 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. Implementou-se um algoritmo no programa MATLAB[®] para a confecção das imagens triboscópicas. Um exemplo de uma imagem triboscópica é retratado na Figura 3.2.

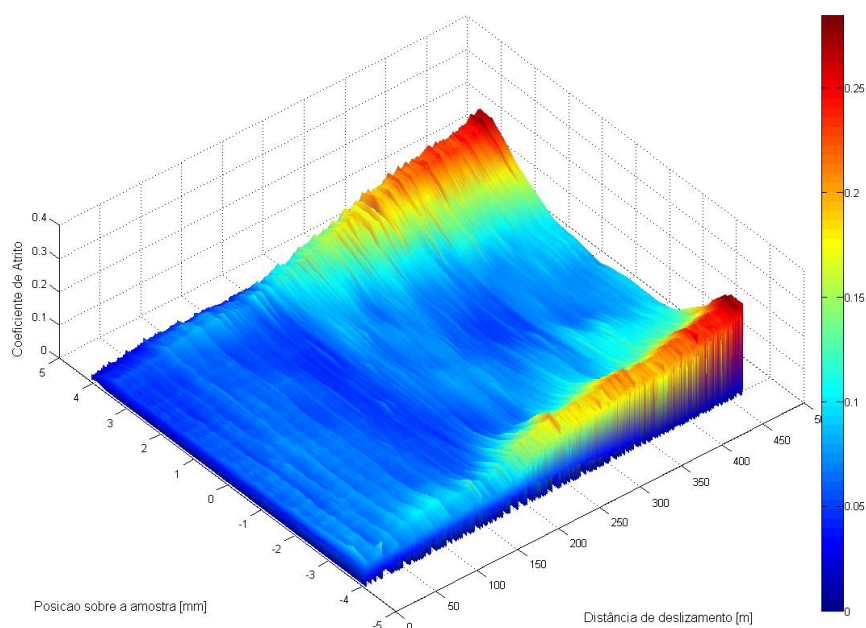


Figura 3.2: Exemplo de uma imagem triboscópica 3D.

Na Figura 3.2 percebe-se que um dos eixos mostra a posição sobre a amostra, ou seja, sobre a trilha de desgaste. Outro eixo mostra a distância deslizada, e, por fim, o último eixo, na posição vertical, mostra o coeficiente de atrito em função dos dois primeiros.

Por meio do uso desta técnica, podem-se localizar algumas 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; BOZZI; DE MELLO, 2006).

Foram executados ensaios tribológicos de desgaste por deslizamento alternativos do tipo pino sobre disco, devido ao fato de poderem reproduzir diferentes regimes de lubrificação.

Com a intenção de estudar a existência de formação de uma tribocamada protetora, foram efetuados primeiramente ensaios de durabilidade, como proposto por (DE MELLO; BINDER, 2006), que consiste em um método de carregamento incremental, com adições de 7 N, em intervalos de 10 minutos, até que o coeficiente de atrito ultrapasse o valor de 0,2. Feito isso, obtém-se a carga crítica, ou seja, a carga máxima que os materiais suportam, que será a carga utilizada na próxima etapa.

Após a determinação da carga crítica, foram efetuados os ensaios de caracterização tribológica, sob carga constante, que foi a carga crítica obtida anteriormente, tendo assim, como resultado o coeficiente de atrito, o desgaste da amostra e do contra corpo.

Para o contra corpo foram utilizadas esferas de aço AISI 52100 de 5 mm de diâmetro. Sua composição química é mostrada na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - 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

O óleo utilizado nos ensaios foi o óleo LAB 240, composto de: óleo linear alquilbenzeno ISO 5 com $2\% \pm 0,5\%$ massa de aditivo antidesgaste (butilado trifenil fosfato = BTP). A Tabela 3.4 mostra as propriedades do óleo LAB 240.

Tabela 3.4: Propriedades do óleo LAB 240.

Propriedades	Especificação	Método	Lote: BL037-0440
Aparência	Líquido Incolor, (livre de contaminação visível)	Visual	Líquido Incolor, (livre de contaminação visível)
Cor	máx. 1,0	ASTM D-1500	<0.5
	máx. 10	Hazen	***
Densidade a 20°C, g/cm ³	0.845 – 0.870	ASTM D-1298	0.860
Viscosidade a 40°C, cSt	4.10 – 4.80	ASTM D-445	4.23
Viscosidade a 100°C, cSt	1.25 – 1.60	ASTM D-445	1.33
Teste de Miscibilidade, HC-600a, °C	máx. -50	DIN 51351	-70
Ponto de Fluidez, °C	máx. -50	ASTM D-97	***
Ponto de Fulgor, °C	min. 135	ASTM D-92	139
Ponto de Combustão, °C	min. 145	ASTM D-92	148
Número de Acidez, TAN mgKOH/g	máx. 0,03	ASTM D-974	0.009
Rigidez Dielétrica, kV	min. 30	ASTM D-877	60
Teor de Umidade, ppm	máx. 100	ASTM D-4928	40
		ASTM E-1064	
Teor de Aditivo Antidesgaste (BTP), % massa	1.55 – 2.45	FTIR / GC	1.67
Teor de Aditivo Antidesgaste (P), % massa	0.131 – 0.208	ICP	0.14
Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)	Alquilbenzeno linear + Aditivo de Éster de Fosfato	FTIR	OK
Cromatografia gasosa / Espectrometria de massa (CG/MS)	Alquilbenzeno linear + Aditivo BTP	GC/MS	OK

3.4 – Interferometria a laser.

Para a medição do desgaste no corpo, usou-se a técnica da interferometria a laser 3D, que foi realizada utilizando-se um equipamento da marca UBM, modelo MESSTECHNIK MicroFocus. Para o cálculo do volume desgastado, utilizou-se o programa Digital Surf

Mountains Map Universal. Após obter-se o volume desgastado, faz-se a divisão deste pela distância deslizada e pela força normal aplicada, obtendo-se a taxa de desgaste (mm^3/Nm).

Utilizou-se uma densidade de pontos de 1000×100 pontos por milímetro, taxa de medição de 300 pts/s, e área de medição suficiente para abranger toda a marca de desgaste, para isso, foi utilizado o modo de medição contínuo.

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 com *cut-off* definido de 0,8 mm.

3.5 – Medição do desgaste do contra corpo.

Para a medição do desgaste do contra corpo (esfera), utilizou-se de uma luneta graduada, cuja escala interna possui resolução de $2 \mu\text{m}$. Após a leitura de dois diâmetros perpendiculares, faz-se a média e tem-se então o valor do diâmetro da calota esférica. Com o diâmetro da calota, pode-se calcular seu volume (V_{calota}), de acordo com as equações 3.1 e 3.2, cujo modelo é mostrado na Figura 3.3.

$$h = r - \sqrt{r^2 - a^2} \quad (3.1)$$

$$V_{\text{calota}} = \frac{1}{3} \pi h^2 (3r - h) \quad (3.2)$$

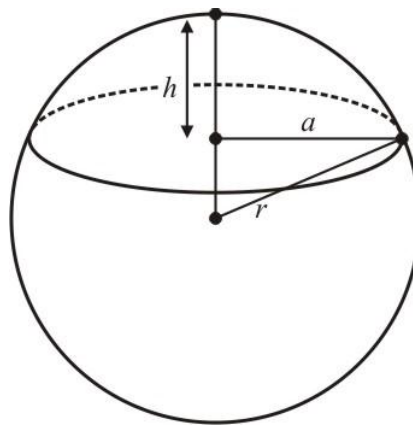


Figura 3.3: Modelo de uma calota esférica.

Onde: “h” é a altura da calota esférica; “a” é o raio da calota esférica e “r” é o raio da esfera.

Após o cálculo do volume desgastado, obtém-se a taxa de desgaste como mencionado anteriormente para o corpo.

3.6 – Avaliação topográfica dos materiais utilizados

Sabe-se que a topografia de superfície exerce bastante 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, recentemente, um número reduzido de parâmetros que juntos pudessem descrever adequadamente as características de uma superfície. Foram selecionados pelos pesquisadores, um parâmetro de amplitude (S_q), um parâmetro híbrido (S_{dq}), um parâmetro funcional (S_{pk}) e um parâmetro funcional (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. Apesar de ainda não constarem em norma, são bem conhecidos na literatura (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1992; 1993). 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 3.3 (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N Z_{jk}^2} \quad (3.3)$$

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 3.4. Quanto menor o valor para este parâmetro, melhor será a refletividade da luz da superfície.

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{j=2}^N \sum_{i=2}^M \left(\frac{z(x_i, y_j) - z(x_{i-1}, y_{j-1})}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{z(x_i, y_j) - z(x_{i-1}, y_{j-1})}{\Delta y} \right)^2} \quad (3.4)$$

O parâmetro funcional S_{pk} corresponde à altura dos picos da superfície e 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 3.4.

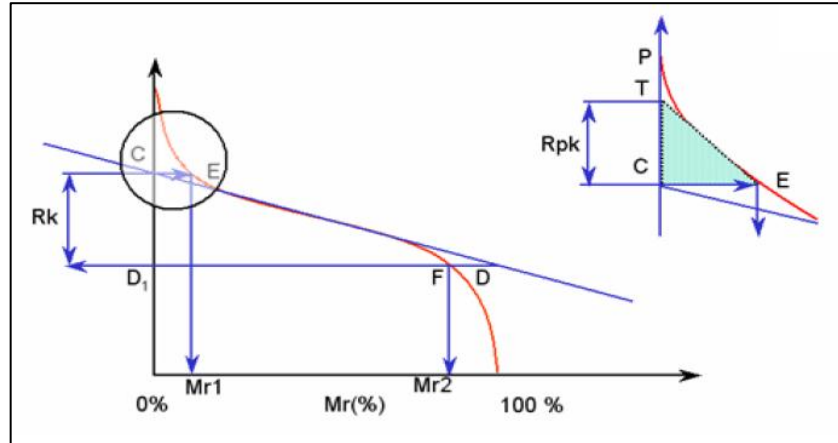


Figura 3.4 – Representação gráfica do parâmetro S_{pk} (TAYLOR HOBSON, 2000).

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 3.5 (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).

$$S_{bi} = \frac{S_q}{\eta_{0,05}} = \frac{1}{h_{0,05}} \quad (3.5)$$

Onde h_{0,05} representa uma altura que revela o truncamento de 5% da área total e η 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 desgastada para a superfície com desgaste, ocorre, geralmente, a elevação do parâmetro.

3.7 – Análise dos debris de desgaste

O recolhimento dos debris de desgaste foi feito logo após o término do ensaio, utilizando-se de fita crepe dupla face, que foi colada sobre a marca de desgaste para o recolhimento. Em seguida, a outra face da fita foi colada em uma lâmina de vidro para posterior recobrimento com ouro.

Após o recobrimento com ouro, a distribuição dos debris foi analisada via MEV, onde foram fotografadas várias áreas desta distribuição. Posteriormente, foi feita uma composição de imagens (Figura 4.15) para total visualização da distribuição das partículas de desgaste.

3.8 – Avaliação dos mecanismos de desgaste

Os mecanismos de desgaste foram avaliados por Microscopia Eletrônica de Varredura, utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM-6390LV e via Interferometria a laser conforme citado anteriormente.

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussão

4.1 – Caracterização metalográfica e dureza

A Figura 4.1 mostra a microestrutura típica da amostra C, onde foram encontradas três diferentes estruturas: ferrita, perlita e lubrificantes sólidos.

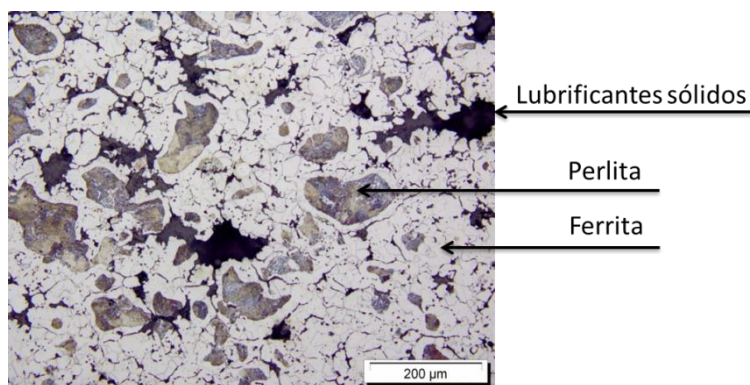


Figura 4.1: Amostra C.

A Figura 4.2, por sua vez, ilustra a microestrutura típica apresentada pela amostra P. A estrutura encontrada é predominantemente martensítica com a presença de lubrificantes sólidos.

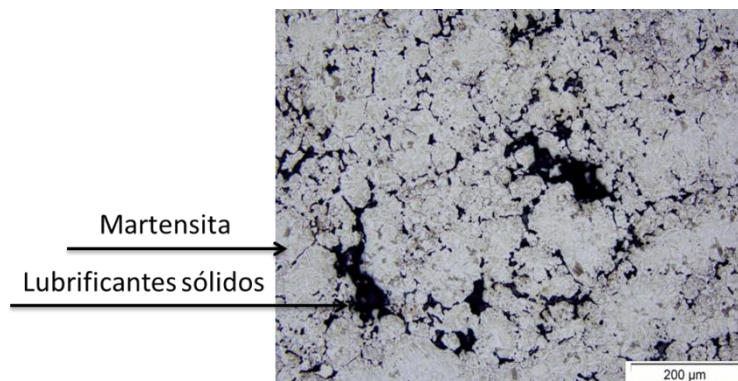


Figura 4.2: Amostra P.

A Figura 4.3-a revela, uma imagem obtida por MEV para a amostra P, sendo destacadas regiões escuras, mostrando a presença de lubrificantes sólidos, indicando que provavelmente seja Nitreto Hexagonal de Boro na região 1 e grafite nas regiões 1 e 2, conforme confirmado por análise via EDS mostradas nas Figuras 4.3-b e 4.3-c.

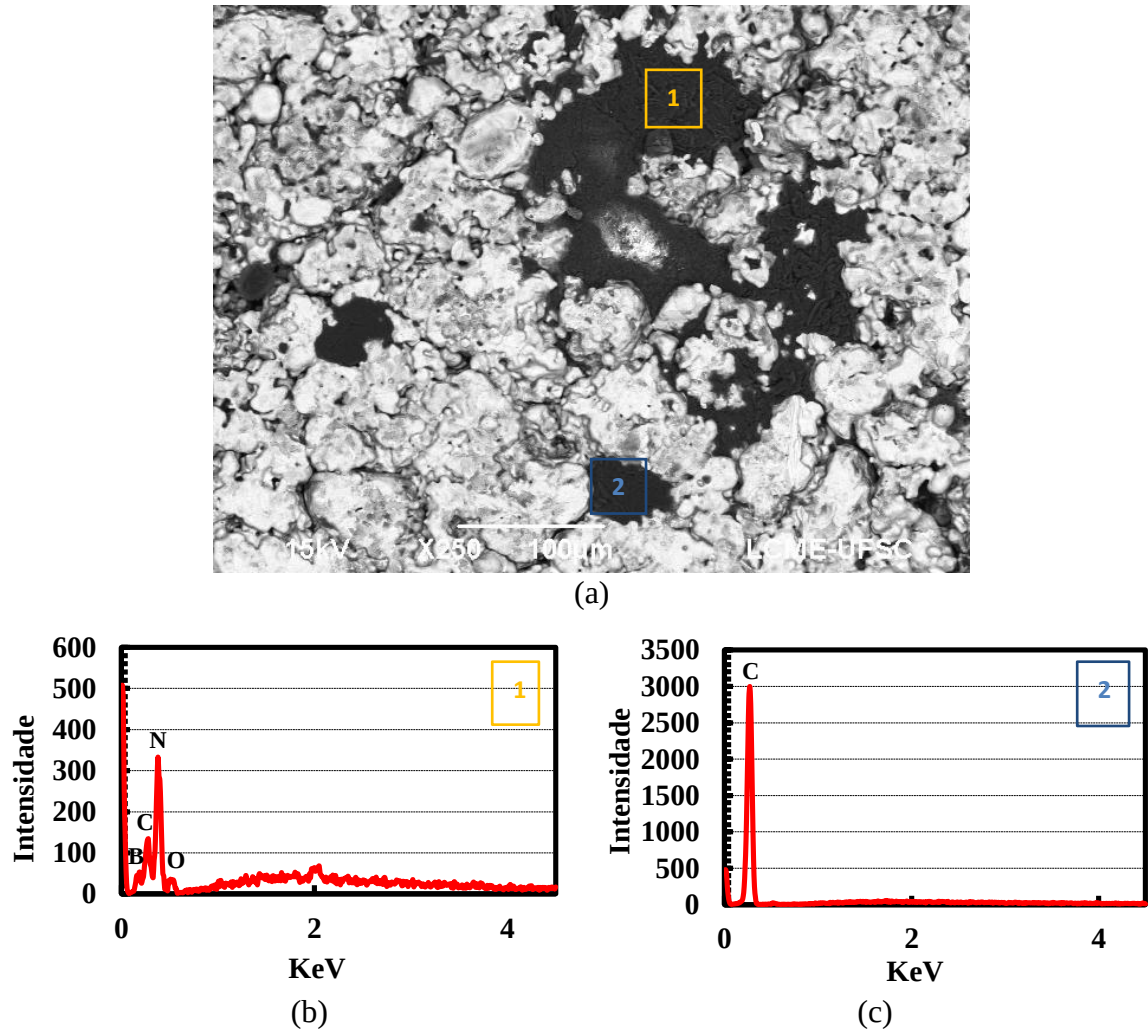


Figura 4.3: Amostra P. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons retroespalhados para a amostra P, (b) Análise via EDS para a região 1 e (c) Análise via EDS para a região 2.

A Figura 4.4 apresenta a microdureza Vickers para as amostras C e P. Como esperado, a amostra P (predominantemente martensítica) apresenta um valor maior para a dureza em relação à amostra C (ferrito-perlítica).

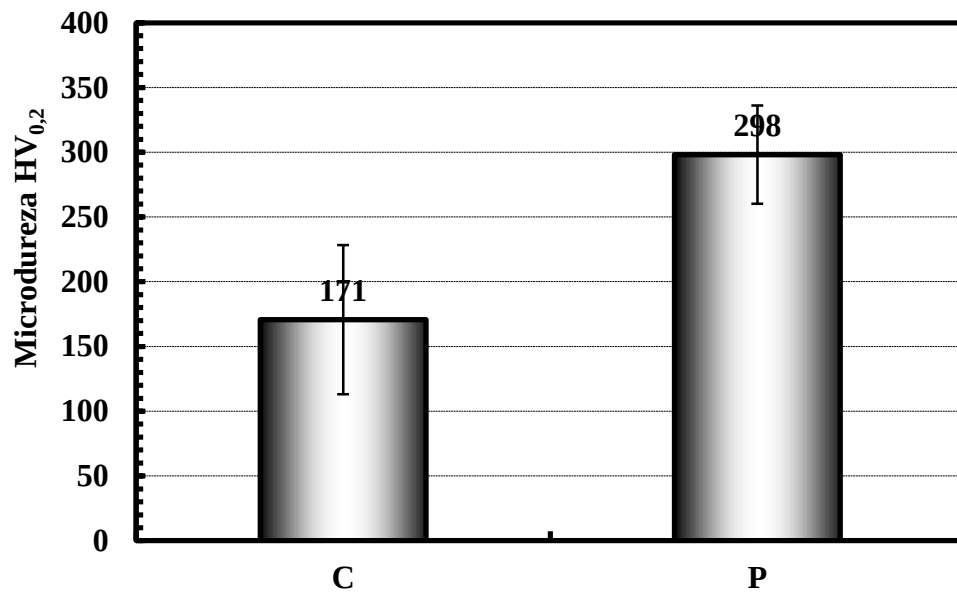


Figura 4.4: Microdureza HV_{0.2} das amostras autolubrificantes.

A Figura 4.5 retrata a metalografia do contra corpo utilizado nos ensaios, onde pode-se verificar que sua estrutura é predominantemente martensítica. Testes de dureza Vickers resultaram em valores de 772 ± 5 HV.

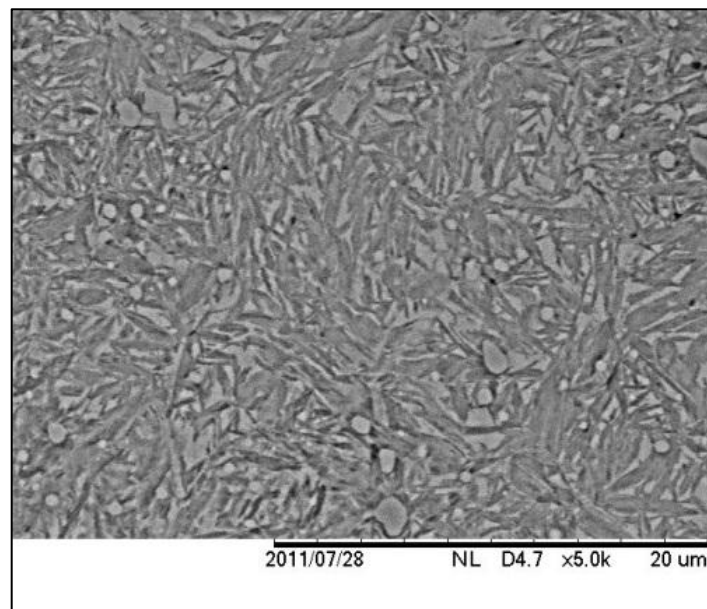


Figura 4.5: Metalografia do contra corpo utilizado nos ensaios.

A Figura 4.6 situa a topografia de superfície das amostras analisada via interferometria a laser.

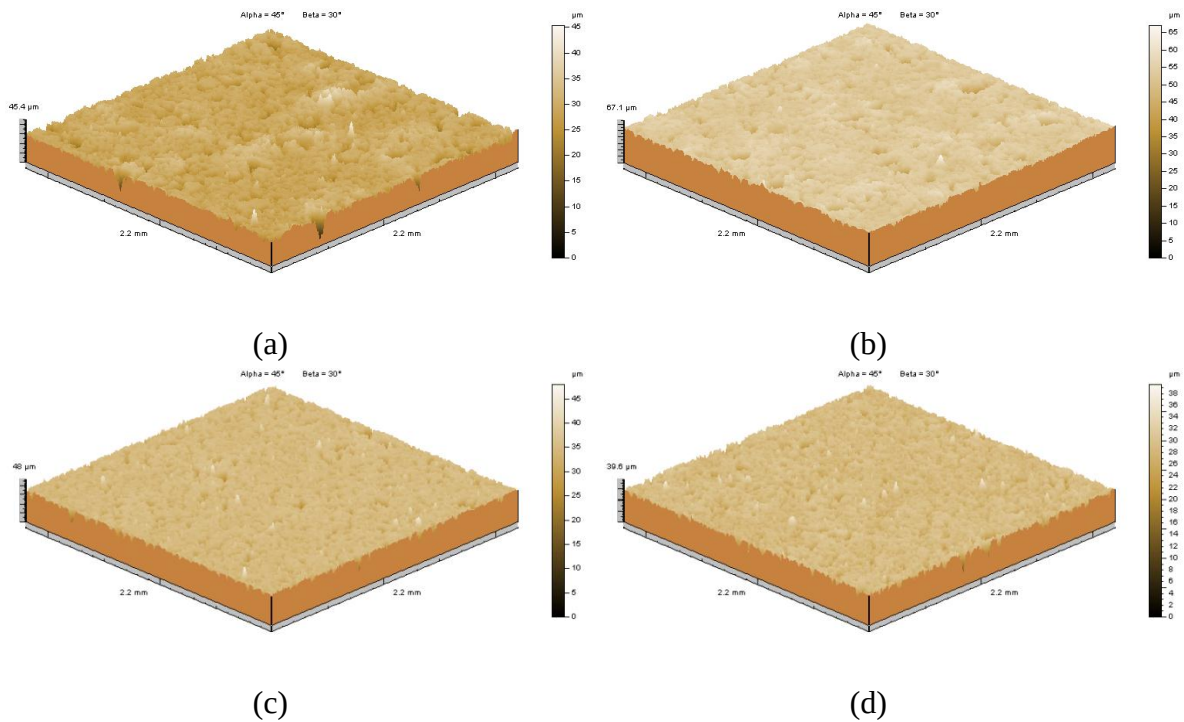


Figura 4.6: Mapa topográfico das amostras. (a) Amostra C; (b) amostra P; (c) amostra CM e (d) Amostra PM.

Observa-se nas imagens da superfície das amostras que a superfície das amostras C e P autolubrificantes parecem ser mais irregulares do que as superfícies relativas às amostras CM e PM, que não possuem lubrificantes sólidos em sua estrutura.

A Figura 4.7 aborda a topografia de superfície analisada via interferometria a laser para o contra corpo utilizado nos ensaios.

A Figura 4.8 se remete aos parâmetros topográficos utilizados para caracterizar a superfície tanto dos espécimens quanto do contra corpo. Observam-se valores reduzidos para os parâmetros S_q , S_{dq} e S_{pk} apresentados pelo contra corpo enquanto a capacidade de apoio S_{bi} apresentou um valor próximo ao das amostras. Nota-se que a adição de lubrificante sólido aumenta os valores dos parâmetros que representam a rugosidade quadrática média (S_q) e a altura dos picos da superfície (S_{pk}), não influenciando na inclinação média das irregularidades (S_{dq}). Essa constatação pode ser explicada pela maior quantidade de poros visíveis nas amostras C e P, como mostrado na Figura 4.6. Para o parâmetro que representa a capacidade de suporte mecânico da superfície (S_{bi}), a adição de lubrificantes sólidos aumenta em aproximadamente 12% para a liga ferrito-perlítica e 18% para a liga martensítica.

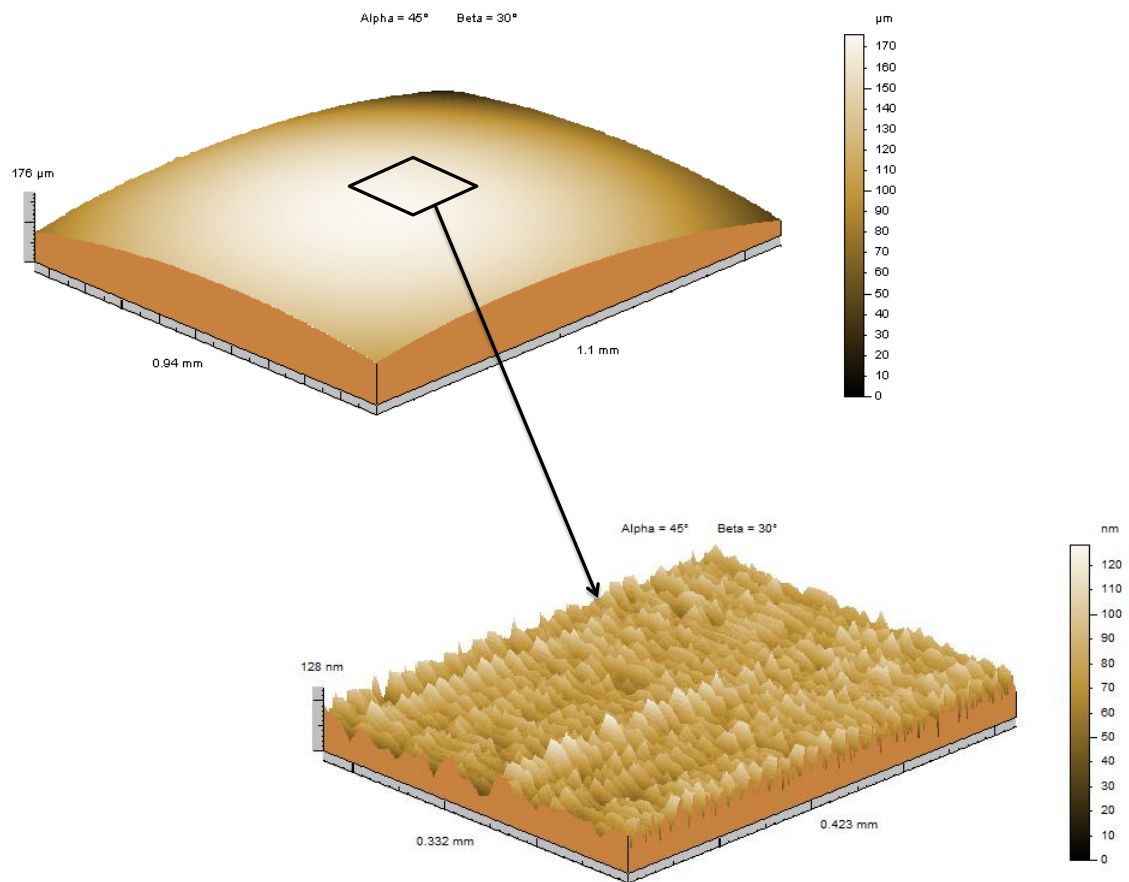


Figura 4.7: Mapa topográfico do contra corpo.

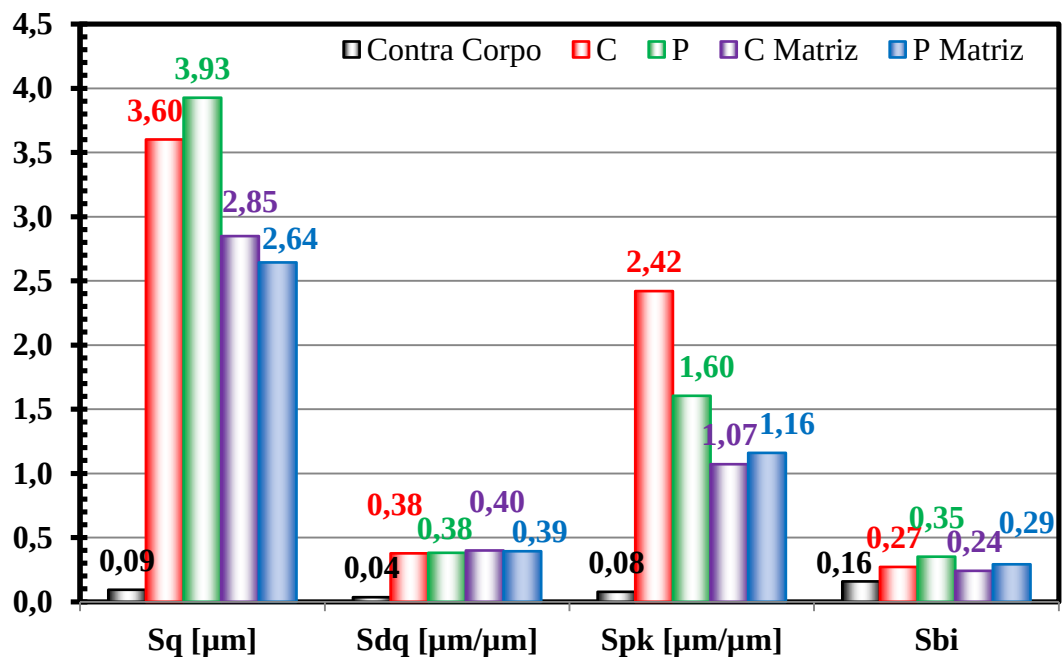


Figura 4.8: Parâmetros topográficos dos materiais utilizados nos ensaios.

4.2 – Ensaios de Durabilidade (Carga variável)

A Figura 4.9 mostra o coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra para as amostras C e P.

A Figura 4.9-a se refere ao caso do ensaio a seco para a amostra C com duração de 1 hora e 50 minutos, com carga de durabilidade de 75,5 N. A Figura 4.9-c ilustra, por sua vez, a evolução do coeficiente de atrito para o mesmo sistema tribológico sujeito a lubrificação fluida, com duração de 4 horas. Todavia, não se ultrapassou a condição de durabilidade, que é o coeficiente de atrito superior a 0,2. Nesse sentido, o ensaio foi interrompido com a carga de 164,8 N, devido ao limite da célula de carga do tribômetro, sendo esta atribuída como a carga de durabilidade para o ensaio.

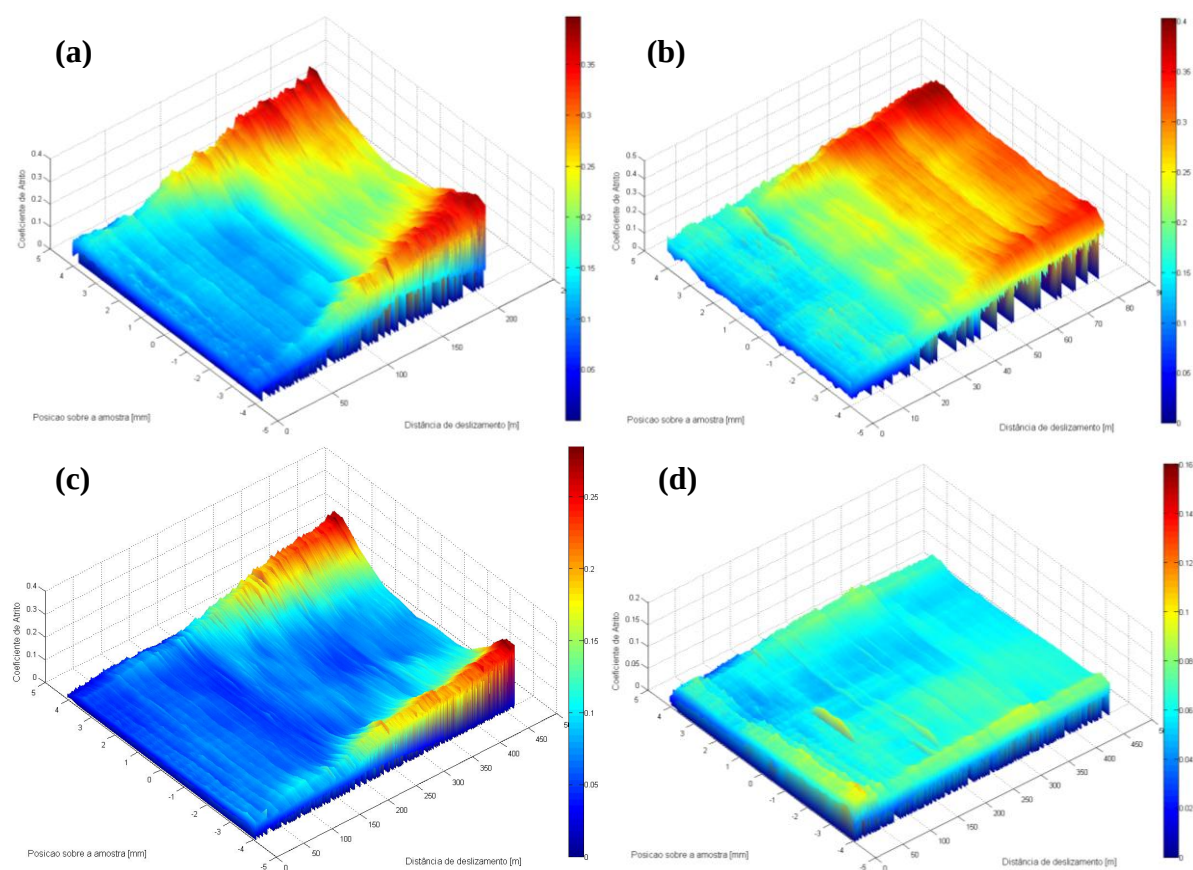


Figura 4.9: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra. (a) e (b) Ensaio seco, ao ar; (c) e (d) Ensaio lubrificado com óleo. À esquerda amostra C e à direita amostra P.

Para a amostra P, o ensaio a seco é mostrado na Figura 4.9-b com duração de 1 hora, com carga de durabilidade de 41,2 N. A Figura 4.9-d ilustra a evolução do coeficiente de

atrato para o mesmo sistema tribológico sujeito à lubrificação fluida. Analogamente ao ensaio efetuado com a amostra C, devido ao limite da célula de carga do tribômetro, o ensaio foi interrompido quando atingida a duração de 4 horas e carga de durabilidade de 164,8 N.

Observa-se na Figura 4.9 que para a amostra C (Figuras 4.9-a e 4.9-c) em ambos os modos de lubrificação (seco ou lubrificado com óleo), esse coeficiente de atrito aparece baixo e uniforme no início do ensaio. Após certo tempo, o coeficiente tende a aumentar juntamente com o aumento da distância deslizada, com um aumento significativamente maior nas extremidades da marca de desgaste. Adicionalmente, a utilização do fluido lubrificante promoveu uma redução significativa no coeficiente de atrito e aumentou significativamente a durabilidade do regime de lubricidade ($\mu < 0,2$) do sistema tribológico.

As amostras PM e CM apresentaram, tipicamente, as mesmas características de suas respectivas ligas autolubrificantes P e C. Entretanto, com durabilidade significativamente inferior para o modo seco. Ambas as amostras são descritas na Figura 4.10.

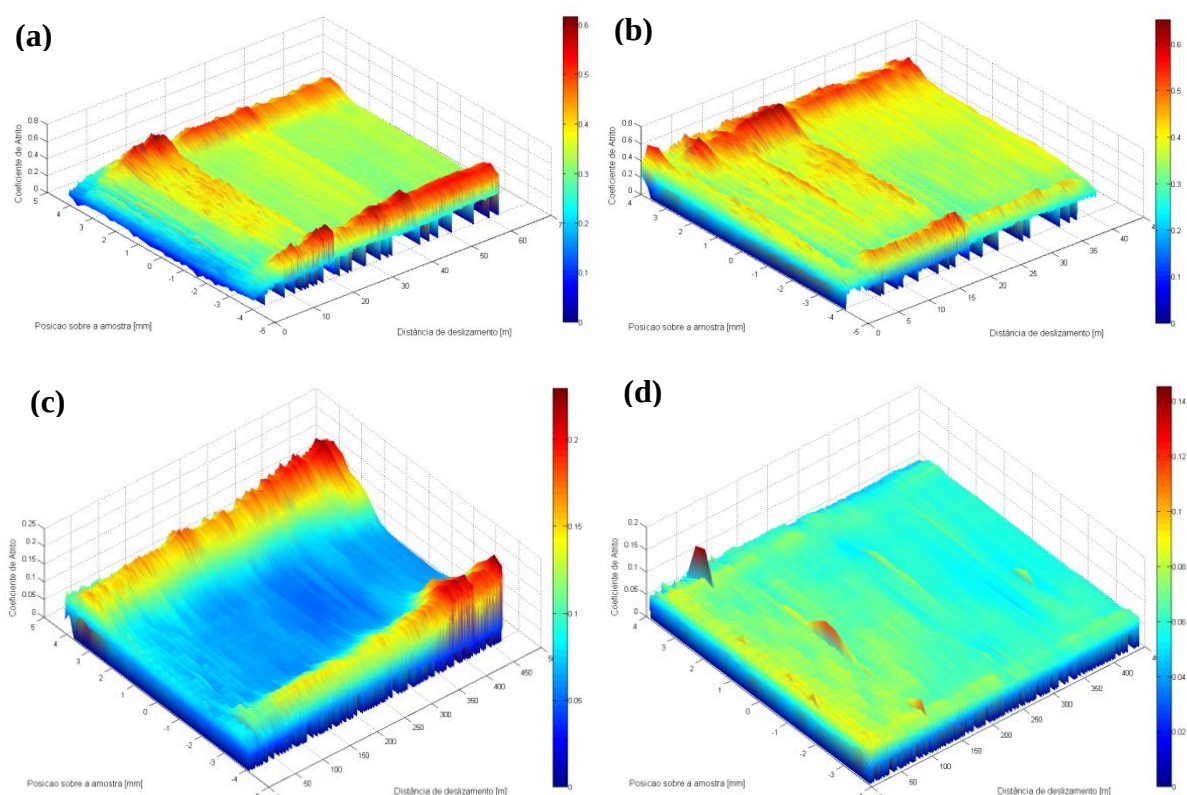


Figura 4.10: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra. (a) e (b) Ensaio seco, ao ar; (c) e (d) Ensaio lubrificado com óleo. À esquerda amostra CM e à direita amostra PM.

Em 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 como já detalhado no Capítulo 2 e;
- ii- O acúmulo de debris na extremidade da marca de desgaste. E este efeito também é desencadeado pela alternância do movimento, em particular a inversão de sentido, com consequente parada nos pontos mortos.

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 a seco.

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 4.11 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.

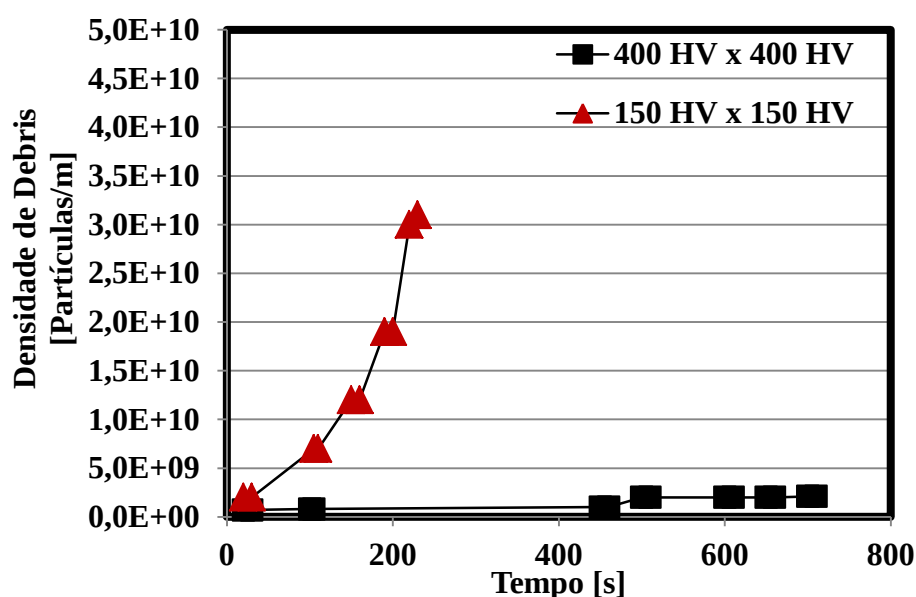


Figura 4.11: Densidade de Partículas em função do tempo de ensaio (adaptado de SHERRINGTON; HAYHURST, 2001).

A Figura 4.12 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 4.11, enquanto que para o par mais duro, este aumento só se dá após os 400 segundos.

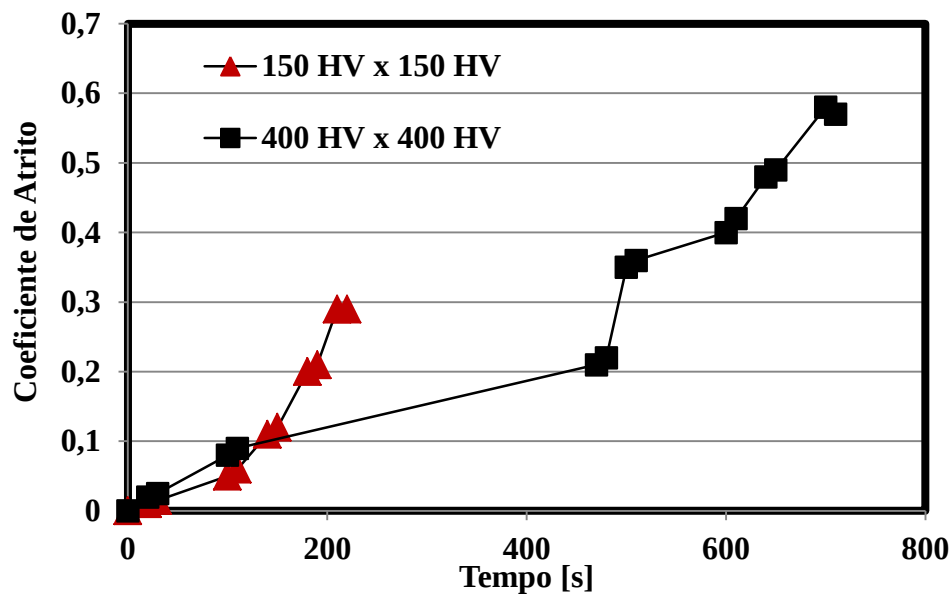


Figura 4.12: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio (adaptado de SHERRINGTON; HAYHURST, 2001).

De fato, na Figura 4.13, 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 analisadas em uma mesma densidade de debris (5×10^9 partículas.m⁻¹), evidenciando que as partículas de desgaste do par mais duro são pelo menos 5 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 (SUH; SIN, 1981).

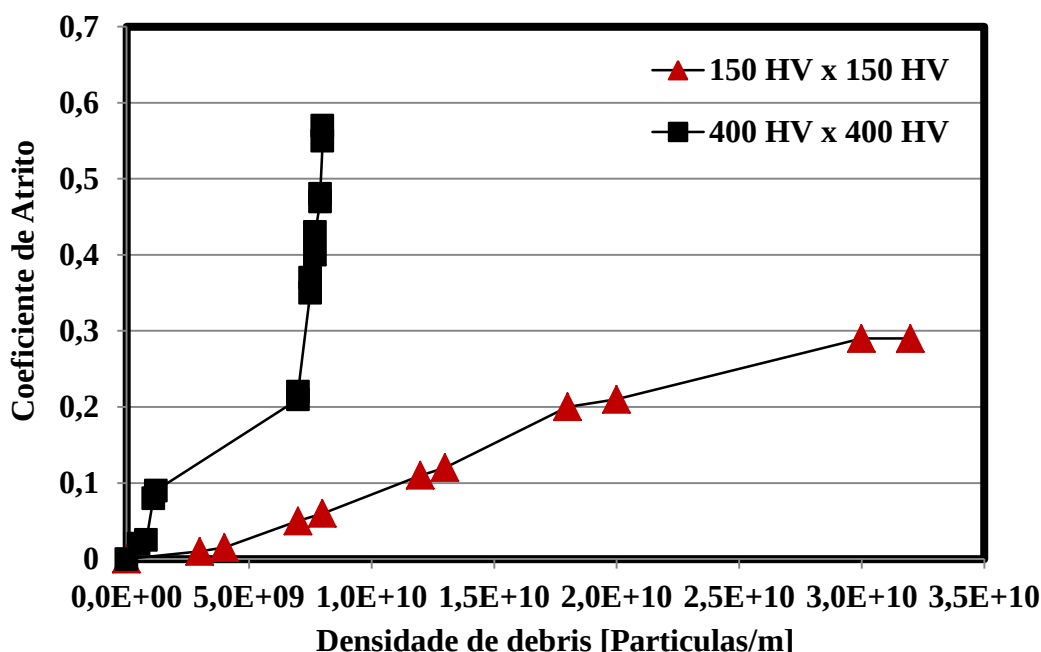
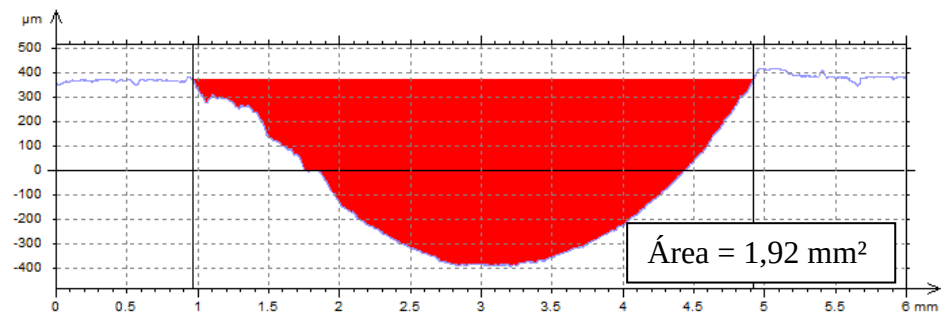


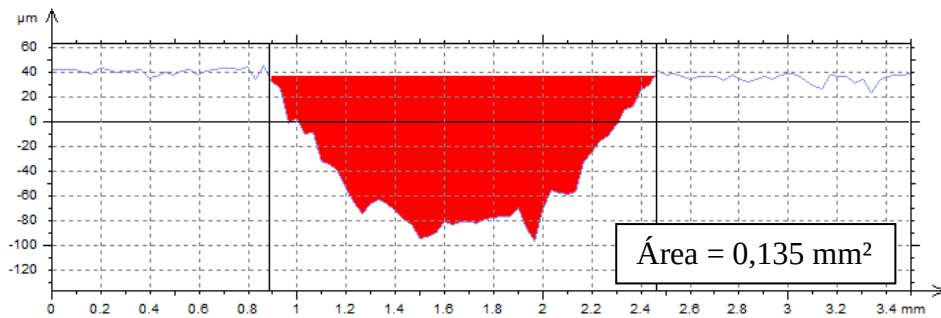
Figura 4.13: Evolução do coeficiente de atrito em função do aumento da densidade de debris (adaptado de SHERRINGTON; HAYHURST, 2001).

Os resultados mostram que, qualitativamente, o aumento no coeficiente de atrito nas extremidades das marcas de desgaste é maior para as ligas ferrito-perlíticas do que para as ligas martensíticas, conforme é observado nas Figuras 4.9 e 4.10. A durabilidade das ligas ferrito-perlíticas é maior (ligas com lubrificante solido) ou igual (ligas matrizes) do que a durabilidade das ligas martensíticas, provavelmente devido à geração de tribocamadas, o que será discutido a seguir. 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 4.14, ilustram claramente o montante de desgaste apresentado. Já a Figura 4.15 evidencia a maior quantidade de debris gerados nas amostras ferrito-perlíticas.

Este aumento do coeficiente de atrito nas extremidades pode ser explicado também pela inversão do movimento, onde a velocidade de deslizamento se torna nula e, em seus arredores, a velocidade é próxima de zero, levando a mudanças nos regimes de lubrificação, como mostrado nas Figuras 2.2 e 2.3.



(a)

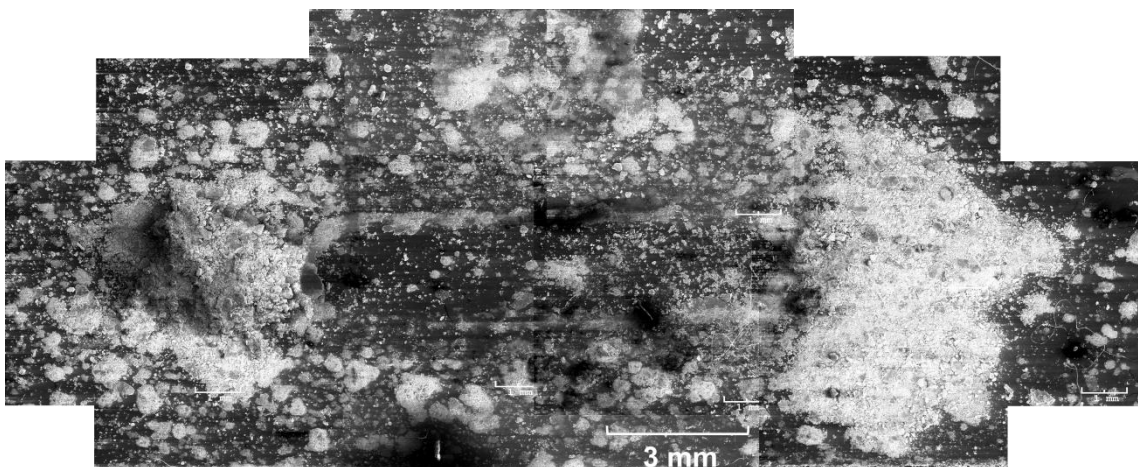


(b)

Figura 4.14: Perfis transversais das marcas de desgaste. (a) Amostra C; (b) Amostra P.



(a)



(b)

Figura 4.15: Aspecto típico da distribuição das partículas de desgaste. (a) Liga P. (b) Liga C.

Para o modo lubrificado com óleo, há o aumento no coeficiente de atrito nas extremidades da amostra C, o que praticamente não ocorre para a amostra P. Eis um indicativo de que há uma maior contribuição do acúmulo de debris para o aumento do coeficiente de atrito do que a mudança nos regimes de lubrificação.

A Figura 4.16 aborda uma síntese da durabilidade encontrada nos ensaios a seco para todas as amostras testadas.

A adição dos lubrificantes sólidos aumentou a durabilidade do sistema tribológico em pelo menos 2 ordens de grandeza quando comparado com as amostras PM e CM que não possuem lubrificantes em sua estrutura.

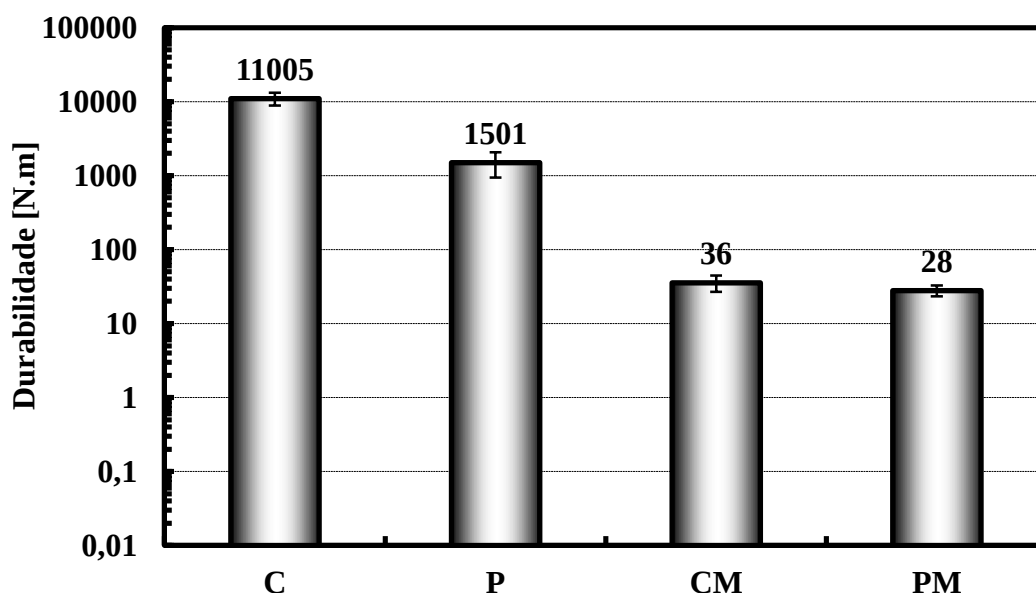


Figura 4.16: Durabilidade para os ensaios a seco para as amostras testadas.

A liga C apresentou uma durabilidade de cerca de 1 ordem de grandeza maior do que a liga P. Isto pode ser explicado pela sua menor dureza, que, provavelmente, acarretou um maior desgaste, conforme é mostrado por perfis da marca de desgaste na Figura 4.14. O maior desgaste libera mais lubrificantes sólidos, deixando o contato mais rico, que por sua vez, produz uma tribocamada mais bem formada. Isso resulta em um coeficiente de atrito menor durante um período maior de tempo, aumentando assim a durabilidade do sistema tribológico, como pode ser observado na Figura 4.17.

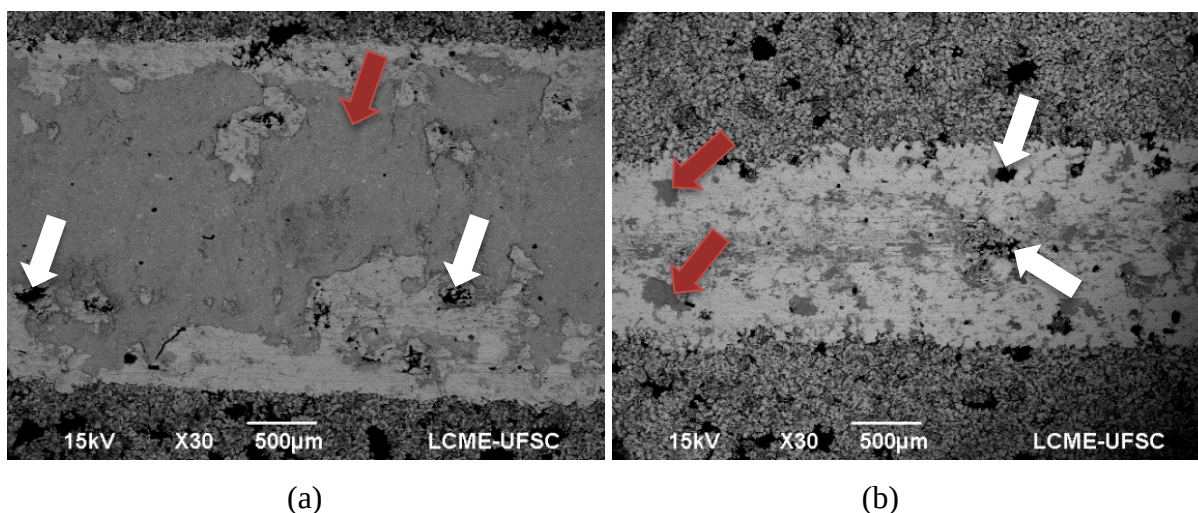


Figura 4.17: Imagens obtidas em MEV por elétrons retroespalhados para as amostras: a) C e b) P, ambas ensaiadas a seco.

Pode-se observar na Figura 4.17 que, de fato, o desgaste foi maior para a amostra C (largura da marca de desgaste), conforme fora mostrado pelos perfis na Figura 4.14. Observa-se também reservatórios ativos dentro da marca de desgaste de lubrificantes sólidos em ambas as amostras, mostrados pelas setas brancas. A tribocamada na trilha de desgaste da amostra C é bem mais evidente e bem formada, mostrada pelas setas vermelhas e é praticamente inexistente para a amostra P.

Recentemente (DE MELLO et al., 2011) explicaram que o notável comportamento tribológico de aços sinterizados autolubrificantes foi devido à formação de uma tribocamada rica em carbono, resultando em um aumento significativo na durabilidade destes materiais. Eles supuseram que folhas de grafite foram removidas dos nódulos de grafite formados durante a sinterização destas ligas e foram carregadas para a interface do contato formando assim uma tribocamada protetora.

A Figura 4.18 ilustra o interior das marcas de desgaste para as amostras C e P no modo lubrificado e também para as amostras CM e PM no modo seco. Observa-se, na figura, a formação da tribocamada, indicada pelas setas brancas, que é bem evidente para C e PM, sendo bem menos formada nas outras amostras. A natureza destas tribocamadas será apresentada e discutida nos resultados relativos aos ensaios de carga constante (tópico 4.3).

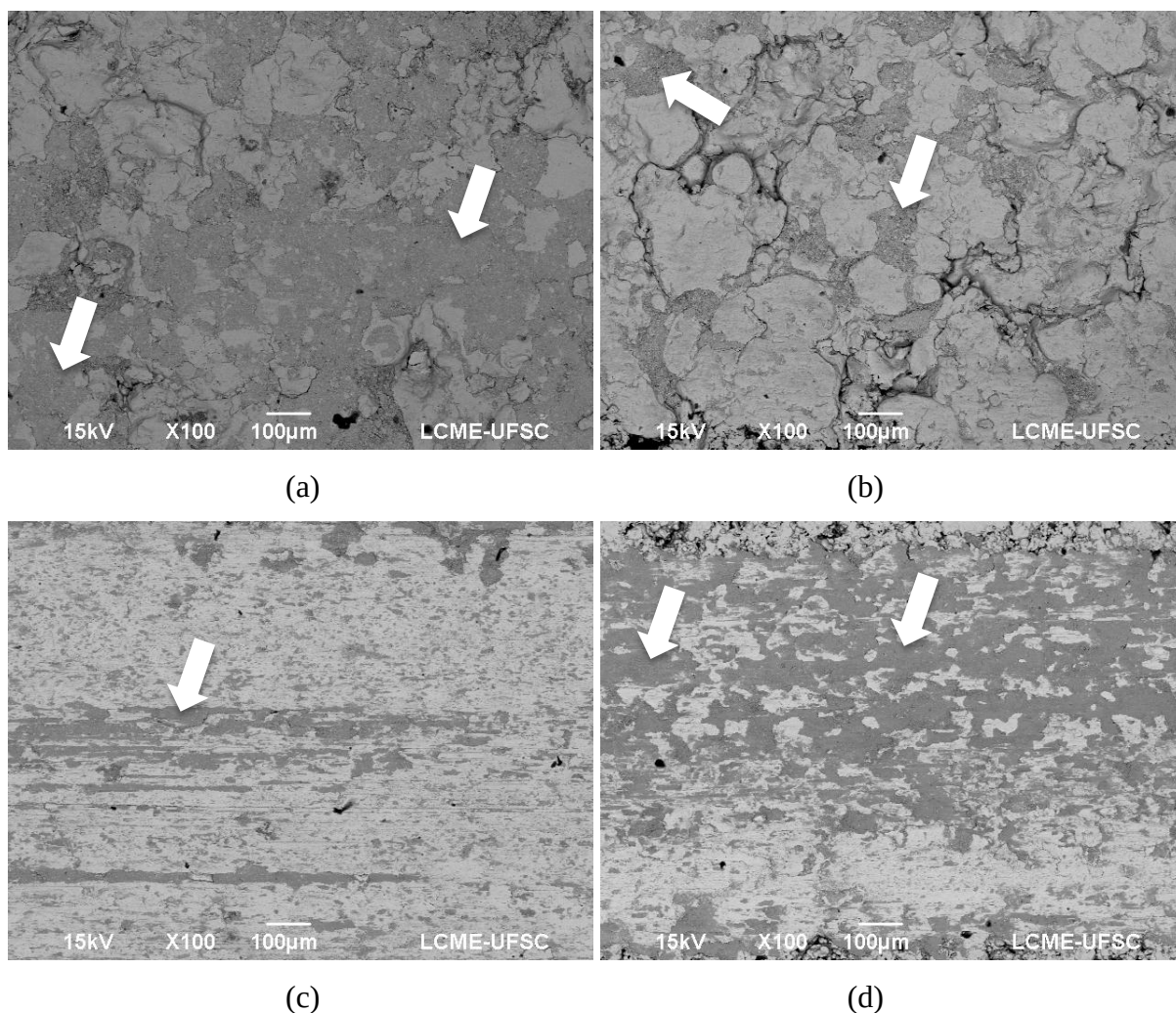


Figura 4.18: Marcas de desgaste. MEV por elétrons retroespalhados. (a) Amostra C; (b) Amostra P; (c) Amostra CM e (d) Amostra PM.

A Figura 4.19 retrata a durabilidade para os ensaios lubrificados com óleo. Observa-se que quando o óleo é inserido no contato, este passa a comandar todo o sistema tribológico, aumentando significativamente a durabilidade e praticamente igualando-a para todas as amostras testadas, mesmo para as amostras que contém lubrificante sólido. Somente com os ensaios de durabilidade, tornou-se difícil evidenciar uma sinergia entre os dois modos de lubrificação.

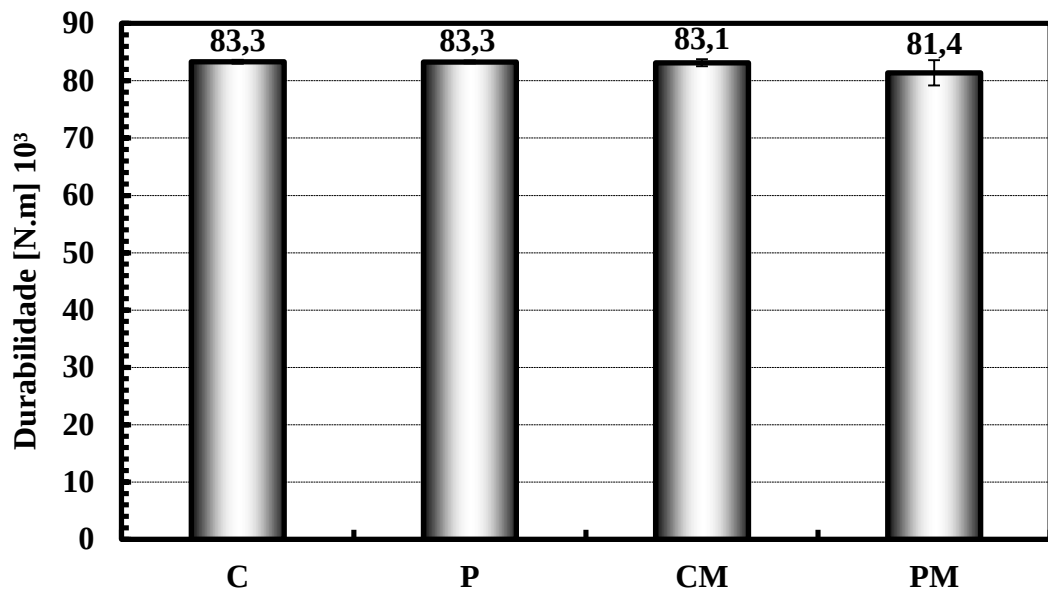


Figura 4.19: Durabilidade para os ensaios lubrificados com óleo LAB 240 para as amostras testadas.

A Figura 4.20 mostra o comparativo da durabilidade para todas as amostras testadas no modo seco e lubrificado. Observa-se que a lubrificação sólida interfere no modo seco aumentando a durabilidade em 2 ordens de grandeza quando comparadas as amostras P e PM e em 3 ordens de grandeza quando comparadas as amostras C e CM. Quando comparadas as amostras C e P, a amostra C (ferrito-perlítica) apresentou durabilidade cerca de 1 ordem de grandeza maior do que a amostra P (martensítica).

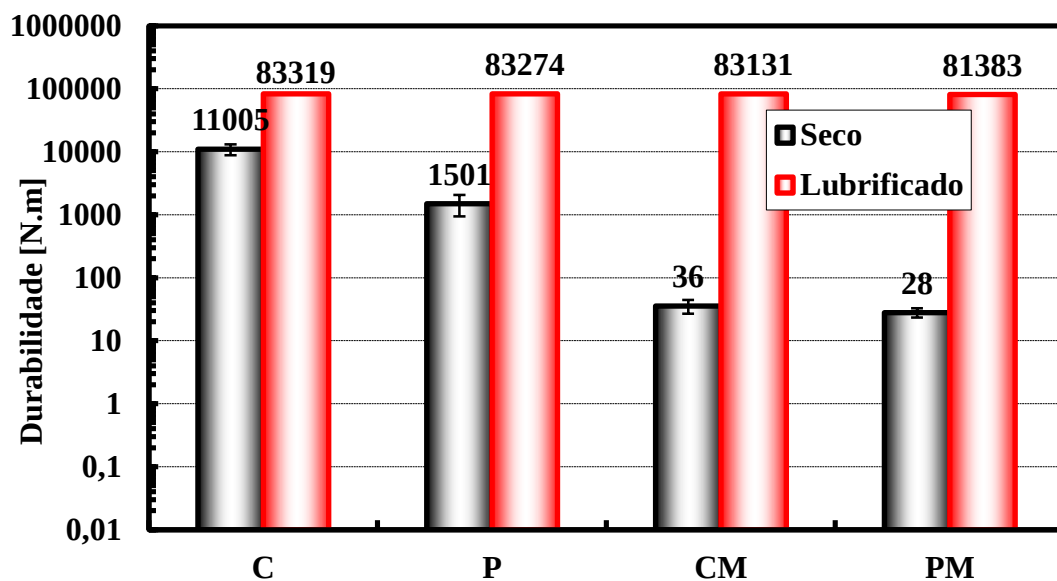


Figura 4.20: Comparativo da durabilidade para todos os ensaios efetuados.

Pode-se observar, ainda, que, com a adição do óleo no contato, a durabilidade aumenta e nivela todos os materiais, apresentando durabilidade cerca de 8 vezes maior que a durabilidade apresentada pela amostra C no modo seco, 1 ordem de grandeza maior que a durabilidade da amostra P, e 3 ordens de grandeza maior que a durabilidade apresentada pelas amostras CM e PM.

4.3 – Ensaios com Carga Constante

4.3.1 – Carga de 27,5 N

A Figura 4.21 demonstra as menores cargas críticas para cada amostra para os ensaios de durabilidade a seco.

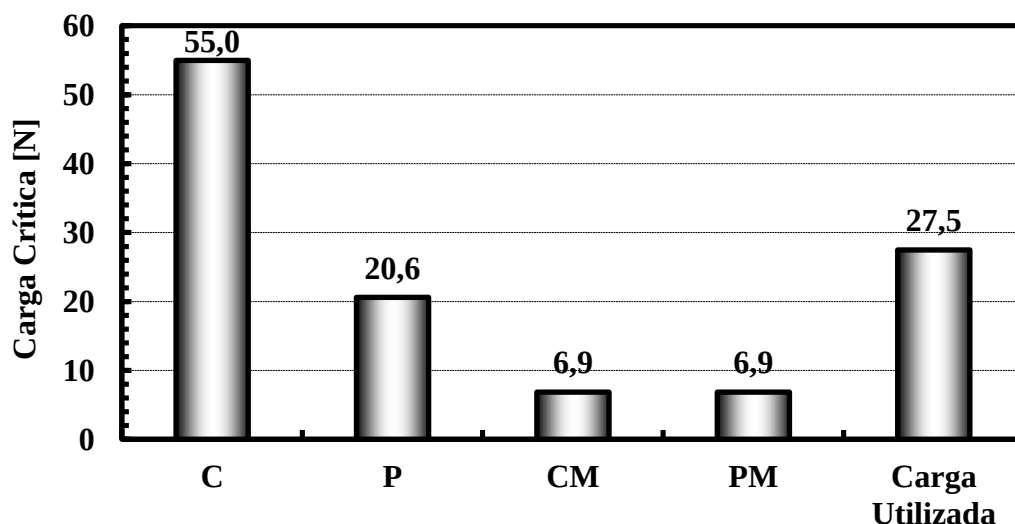


Figura 4.21: Carga crítica de durabilidade a seco para cada amostra.

Devido ao fato das cargas encontradas para cada amostra apresentarem valores bem distintos, foi escolhida uma carga intermediária para os ensaios com carga constante. Os ensaios foram realizados no modo seco, com carga de 27,5 N e duração de 2 horas.

A Figura 4.22 descreve o coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra. É possível perceber que, para as amostras C e P (Figuras 4.22-a e 4.22-b respectivamente), o coeficiente de atrito é baixo no início do ensaio e segue com leve aumento na região central da marca até o fim do ensaio. Em contrapartida, aumenta com o tempo nas extremidades da marca de desgaste. Nota-se para as amostras CM e PM um ligeiro aumento no coeficiente de atrito nas extremidades e pouca flutuação no seu valor durante todo o ensaio.

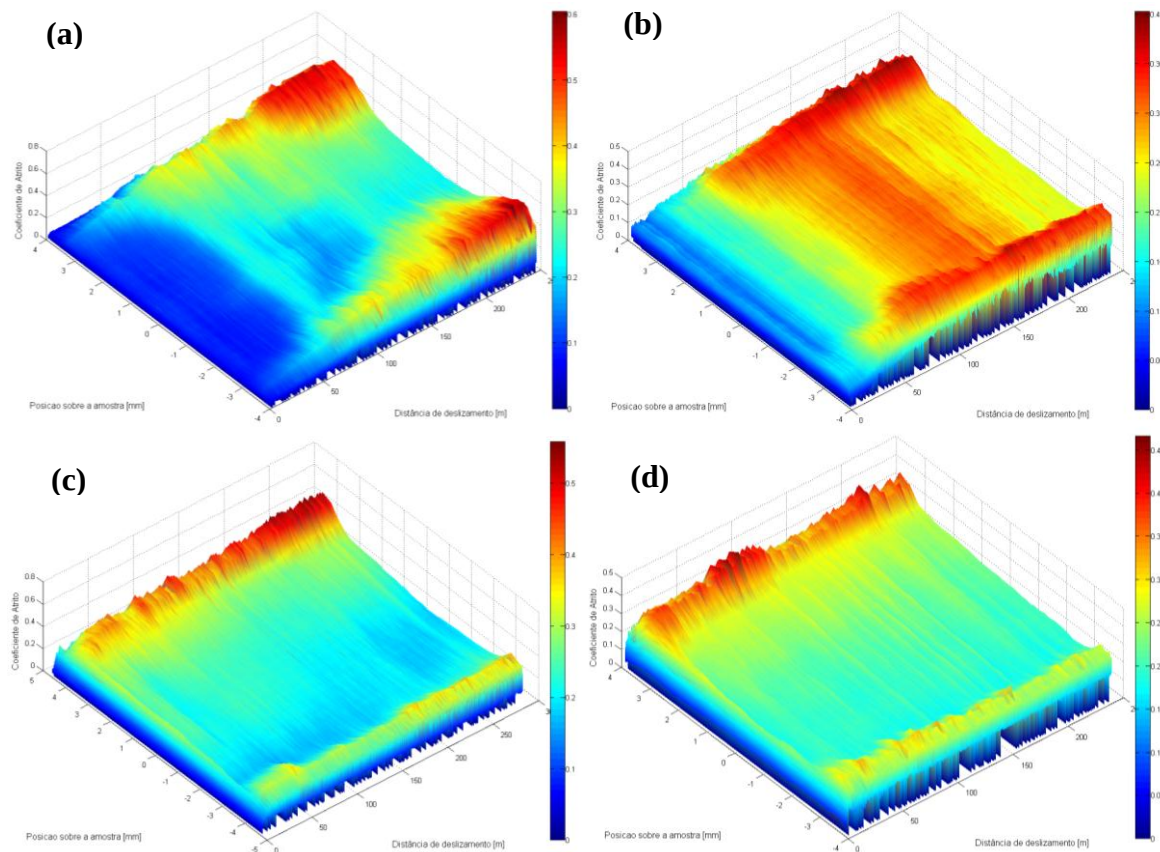


Figura 4.22: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra. Ensaio seco, ao ar. (a) Amostra C; (b) Amostra P; (c) Amostra CM e (d) amostra PM.

A Figura 4.23 ilustra o coeficiente de atrito médio.

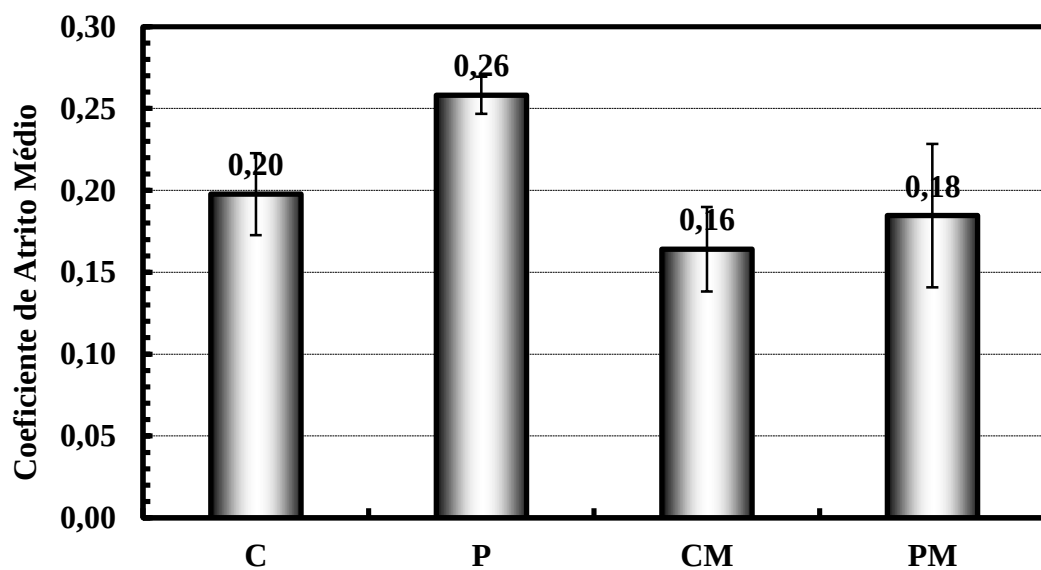


Figura 4.23: Coeficiente de atrito médio para as amostras testadas.

Para a amostra P, o valor do coeficiente de atrito médio é mais elevado do que o apresentado pelas demais amostras. Isso indica que, nesta condição, a amostra P está fora do regime de lubricidade ($\mu > 0,2$).

A Figura 4.24 apresenta imagens obtidas via interferometria a laser para as amostras testadas, onde se visualiza que a marca de desgaste para a amostra C é significativamente maior que para a amostra CM. Essa marca de desgaste parece maior que as marcas das amostras P e PM.

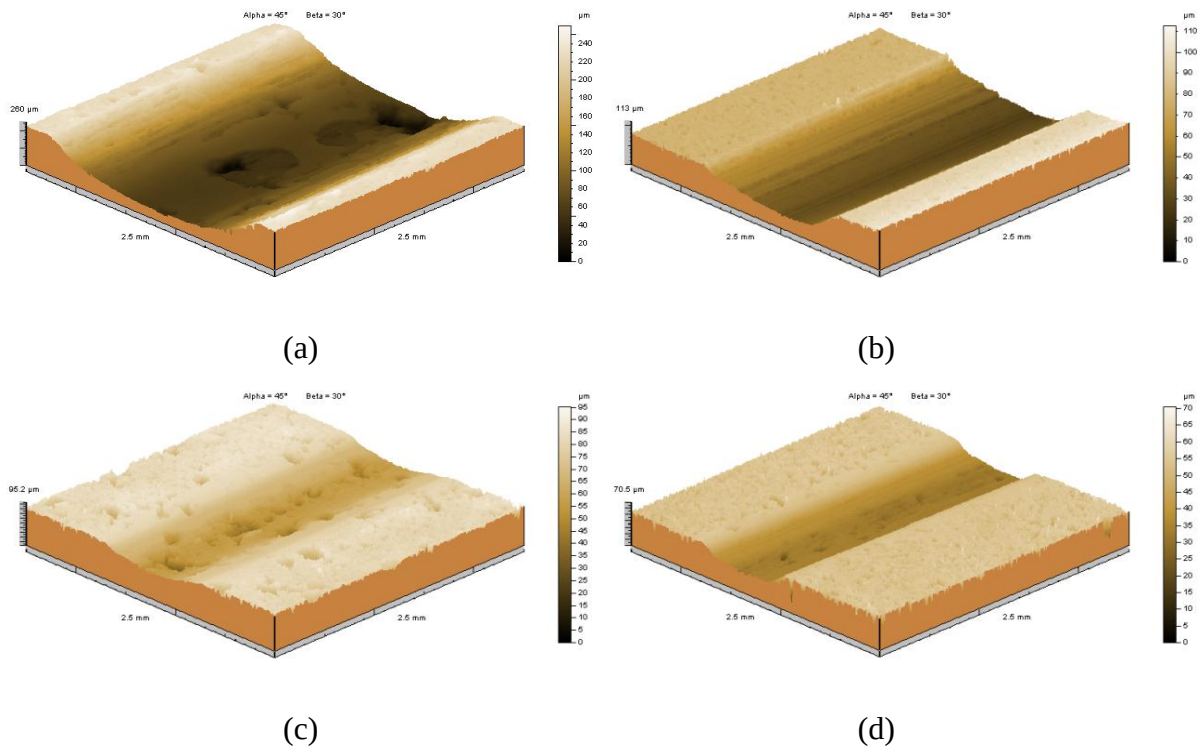


Figura 4.24: Imagens obtidas via interferometria a laser para as amostras: (a) C, (b) CM, (c) P, (d) PM.

A Figura 4.25 revela quantitativamente a taxa de desgaste para as amostras. Percebe-se uma notável diferença na taxa de desgaste para a amostra C, onde a adição do lubrificante sólido parece contribuir para um aumento significativo na taxa de desgaste enquanto que para as ligas P esta adição não apresenta efeito significativo na taxa de desgaste. Observa-se, ainda, que as ligas P (mais duras) sofrem menores desgastes, independentemente da presença de lubrificantes sólidos.

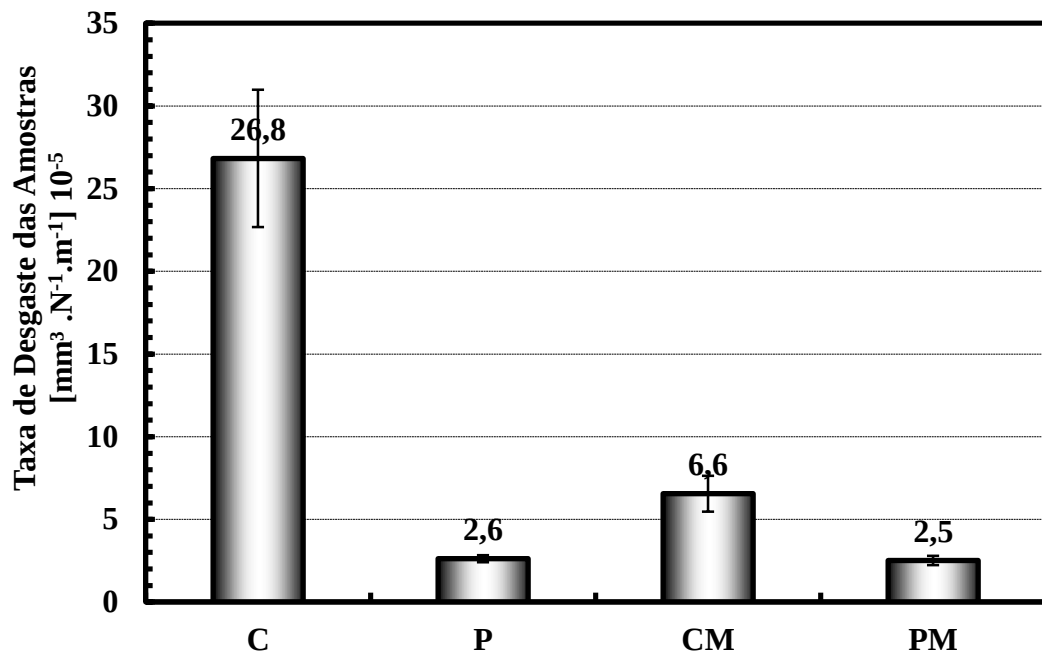


Figura 4.25: Taxa de desgaste.

A Figura 4.26 apresenta os mecanismos de desgaste para as amostras C e CM, onde se percebe a formação de uma intensa tribocamada, evidenciada pela presença de ilhas lisas de coloração cinza claro nas imagens da marca de desgaste da amostra C, mostradas pelas setas brancas. Ressalta-se ainda a presença de vários reservatórios de lubrificante sólido ativos nesta mesma superfície mostradas pelas setas vermelhas. Para a amostra CM, a formação da tribocamada se dá de uma forma bem menos intensa e, provavelmente, com composição química diferente, ou seja, isenta de lubrificante sólido, destacada pelas setas azuis.

A Figura 4.27 se remonta a imagens obtidas por MEV para a amostra C com uma ampliação maior, juntamente com análise de EDS, para melhor visualização da tribocamada formada no contato.

Na Figura 4.27, para a amostra C, pode-se notar que nas áreas pretas estão presentes os lubrificantes sólidos hBN e grafite misturados, para a camada na cor cinza foi constada rica presença de óxidos de ferro e carbono.

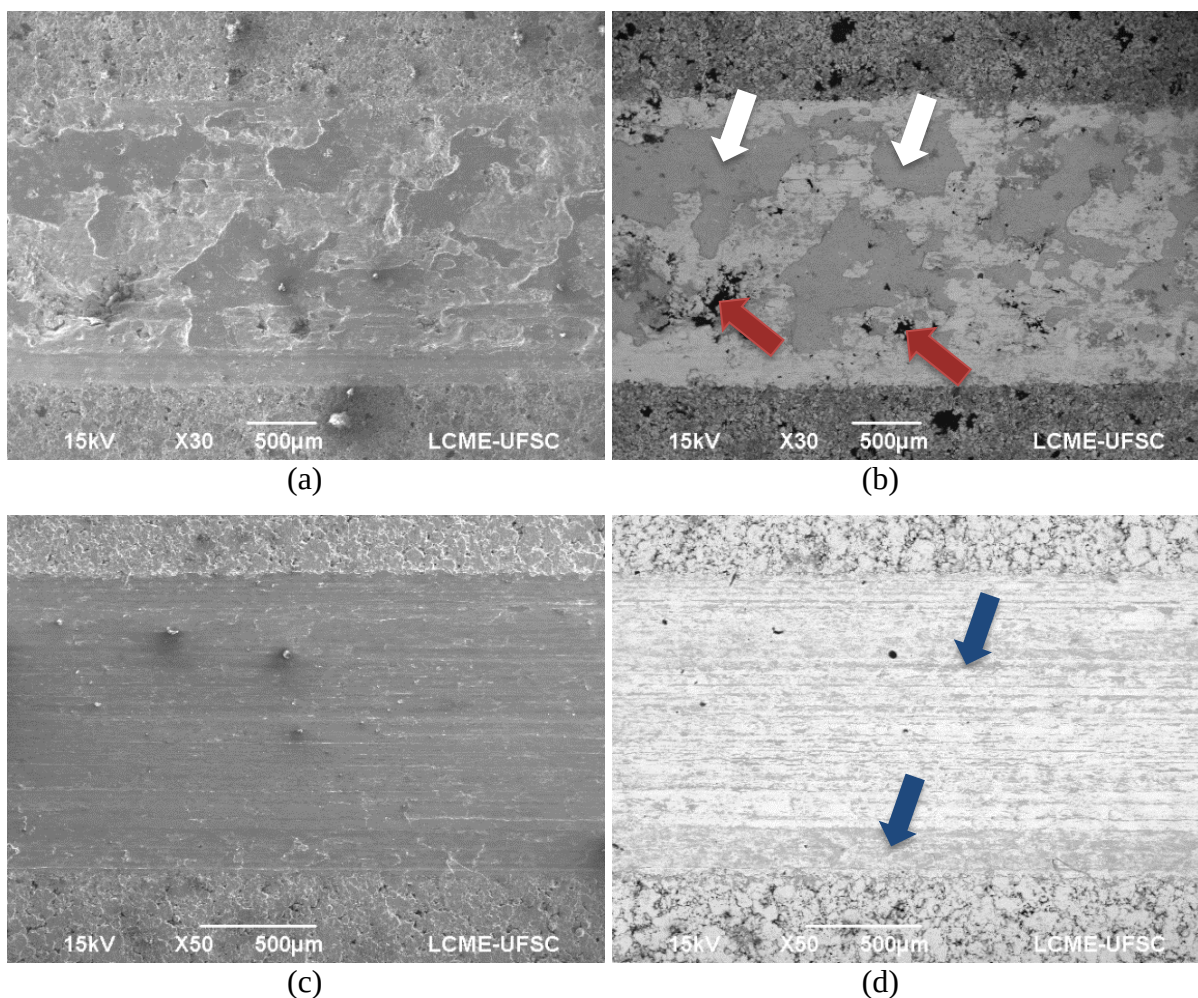


Figura 4.26: Mecanismos de desgaste. MEV. (a) e (b) Amostra C; (c) e (d) Amostra CM. À esquerda imagens produzidas por elétrons secundários e à direita imagens produzidas por elétrons retroespalhados.

A Figura 4.28 mostra com mais detalhes a tribocamada formada no contato para a amostra CM, juntamente com as análises via EDS.

Para a Figura 4.28 constatou-se a presença de carbono e óxido de ferro nas duas regiões, porém com maior intensidade para as regiões mais escuras (região 1), descritas pelas análises feitas por EDS nas regiões 1 e 2, representadas respectivamente pelas Figuras 4.18-c e 4.28-d.

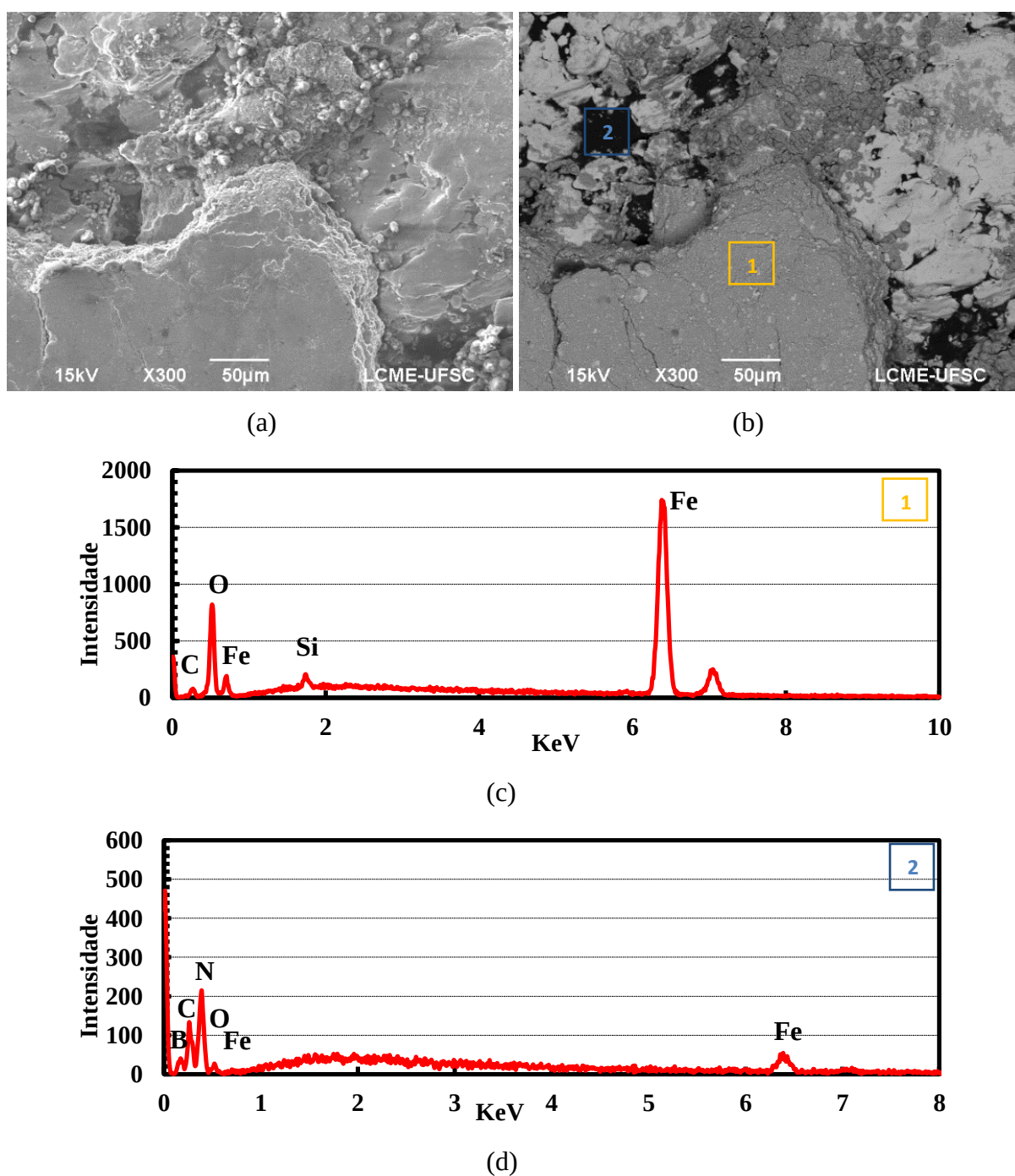


Figura 4.27: Mecanismos de desgaste para a amostra C. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS da região 1 e (d) Análise via EDS da região 2.

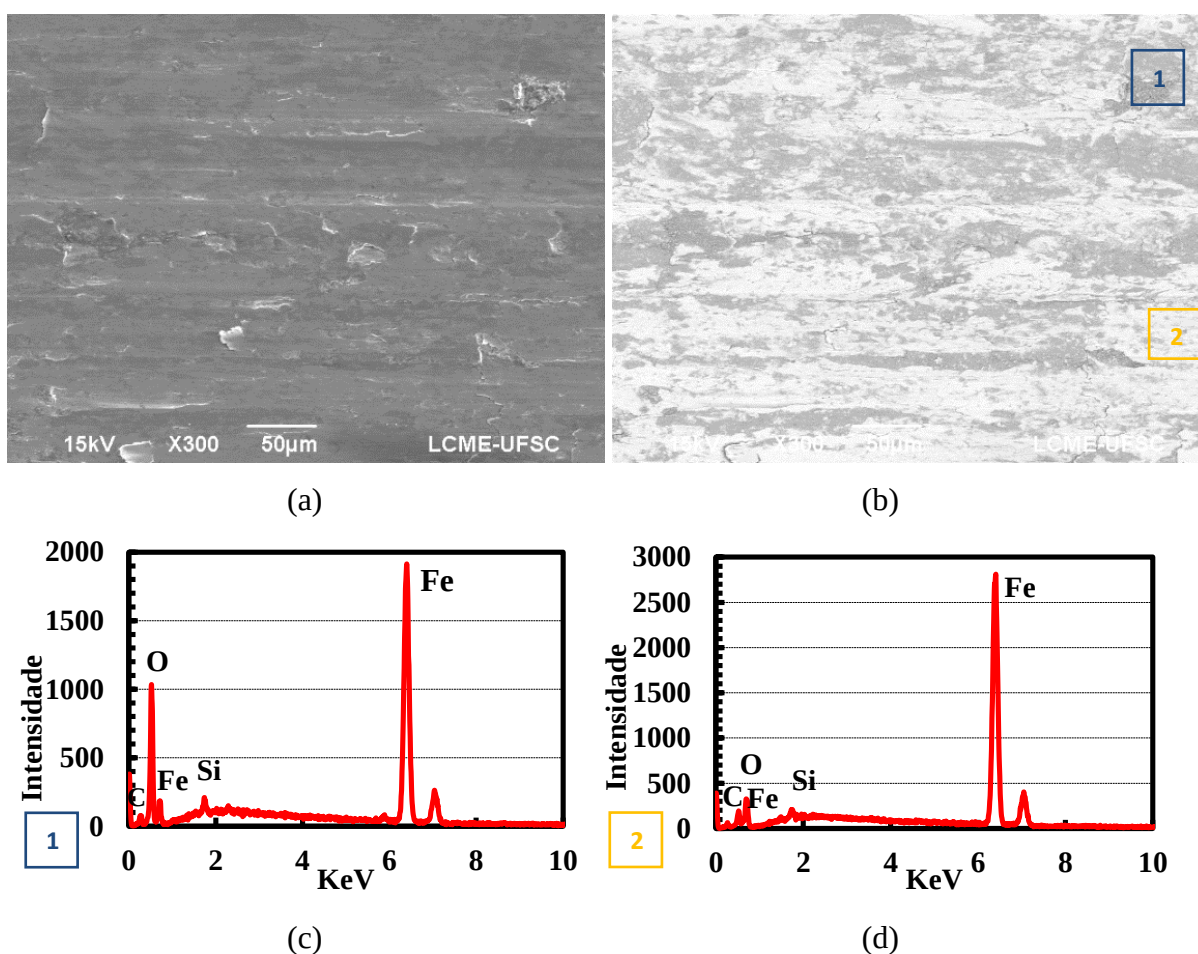


Figura 4.28: Mecanismos de desgaste para a amostra CM. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS da região 1 e (d) Análise via EDS da região 2.

Para a liga P visualizada na Figura 4.29, a adição do lubrificante sólido na matriz metálica não resultou em uma diferença significativa na taxa de desgaste, como mostrado na Figura 4.25. Observa-se também que não há formação de uma tribocamada generalizada como ocorrido para a amostra C.

É possível notar marcas de abrasão na Figura 4.29-a, demonstradas pelas setas brancas, na direção do deslizamento as quais, segundo (DE MELLO et al., 2013a), podem ser oriundas de debris de desgaste oxidados e duros gerados na interface do contato. Percebe-se também a presença de alguns reservatórios de lubrificantes sólidos ativos nesta mesma superfície, representados pelas setas vermelhas.

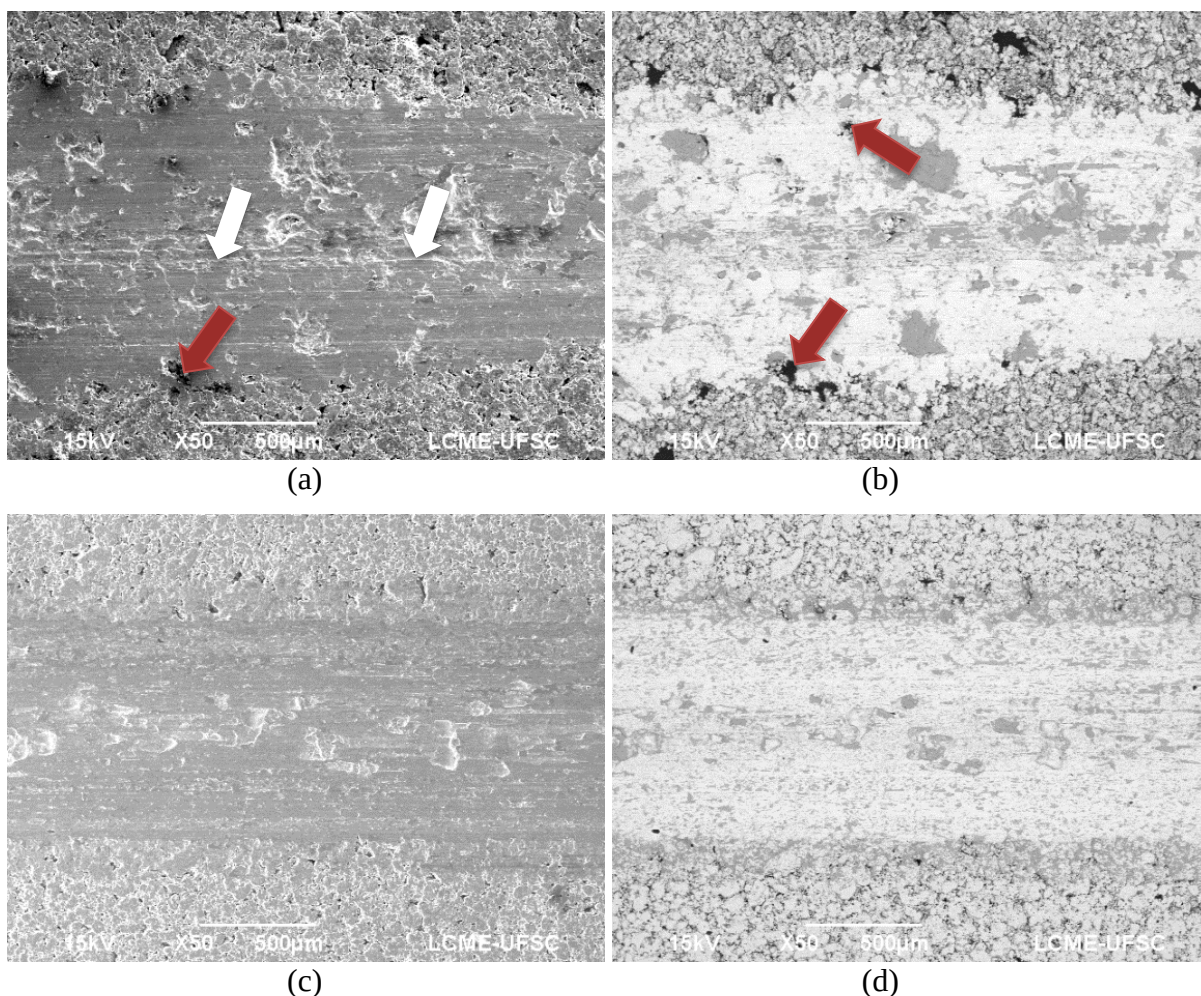


Figura 4.29: Mecanismos de desgaste. MEV. (a) e (b) Amostra P; (c) e (d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.

As Figuras 4.30 e 4.31 revelam com mais detalhes a superfície da marca de desgaste para as amostras P e PM, juntamente com análises via EDS, onde percebe-se que há regiões mais escuras, onde foi constatado via EDS a presença de óxidos de ferro e carbono assim como evidenciado para as amostras C e CM, mas também foram constatadas presenças de cromo, que podem ser oriundos do contra corpo.

A Figura 4.32 aborda a taxa de desgaste dos contra corpos. Apesar da dureza do contra corpo ser relativamente maior que a dureza das amostras, a diferença na dureza das duas ligas C e P causou uma diferença no desgaste do contra corpo, podendo indicar a presença de um componente triboquímico.

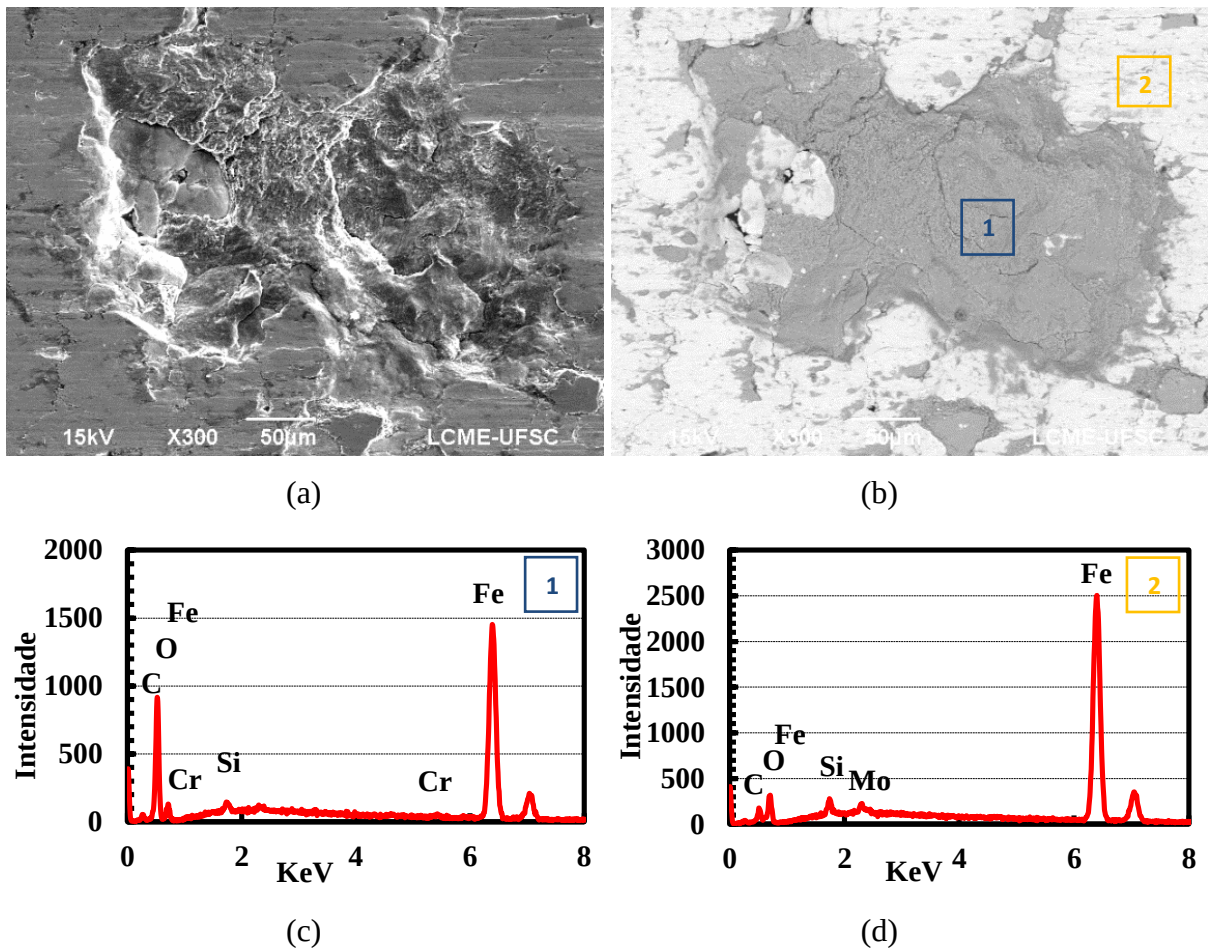


Figura 4.30: Mecanismos de desgaste para a amostra P. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS da região 1 e (d) Análise via EDS da região 2.

Observa-se para a Figura 4.32 que a taxa de desgaste dos contra corpos é 1 ordem de grandeza menor que a taxa de desgaste das amostras, não causando diferença significativa no desgaste do sistema. Compreende-se também que, com a adição do lubrificante sólido, a taxa de desgaste do contra corpo aumenta significativamente. Independentemente da adição ou não de lubrificantes sólidos, os contra corpos ensaiados com a liga C apresentaram um desgaste menor que a liga P. Verifica-se que a taxa de desgaste é cerca de 2 vezes maior para a amostra P quando comparada com a amostra PM e para a amostra C e CM. Houve, nesse sentido, diferença significativa na taxa de desgaste do contra corpo. A liga P apresentou o maior desgaste entre todos.

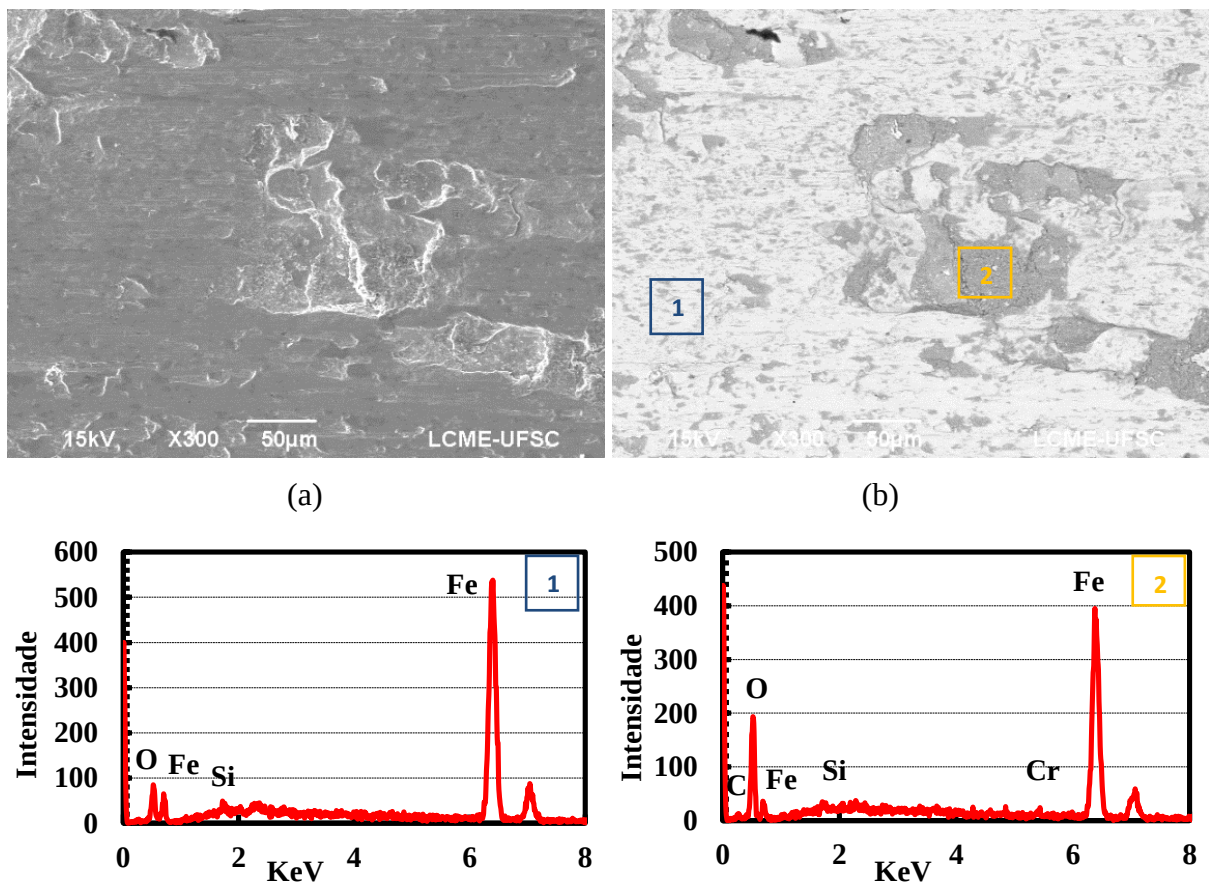


Figura 4.31: Mecanismos de desgaste para a amostra PM. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS da região 1 e (d) Análise via EDS da região 2.

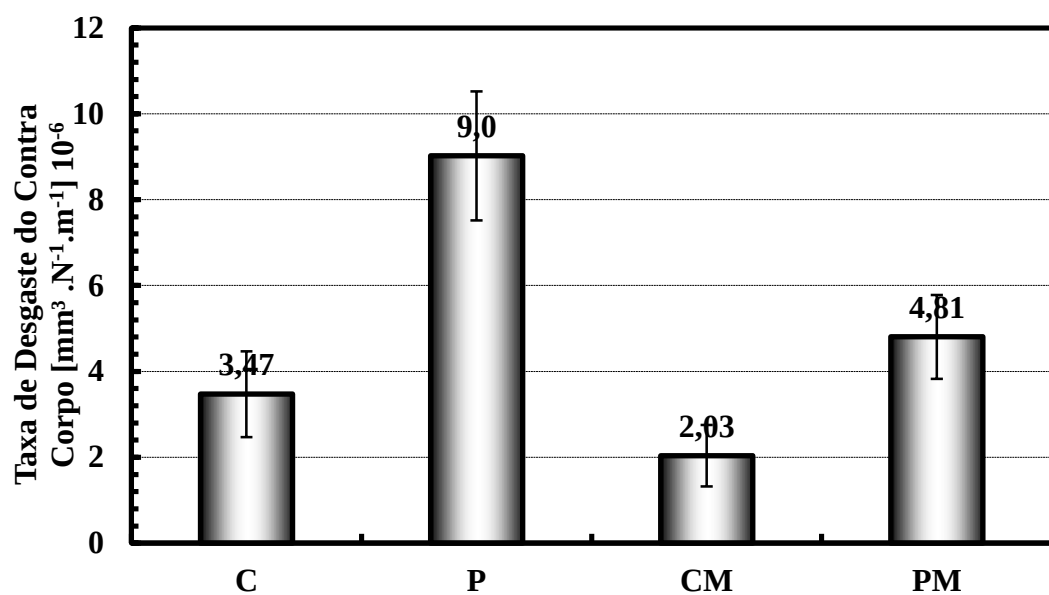


Figura 4.32: Taxa de desgaste para o contra corpo.

A Figura 4.33 apresenta imagens obtidas por MEV para os contra corpos ensaiados com as amostras C e CM. Observa-se que, para ambas as amostras, houve a presença de uma tribocamada, porém com maior intensidade no contra corpo da amostra C, onde os resíduos se acumularam dentro e fora da marca de desgaste. Já para a amostra CM, a tribocamada foi menos bem formada, com maiores quantidades de resíduos formados fora da marca de desgaste.

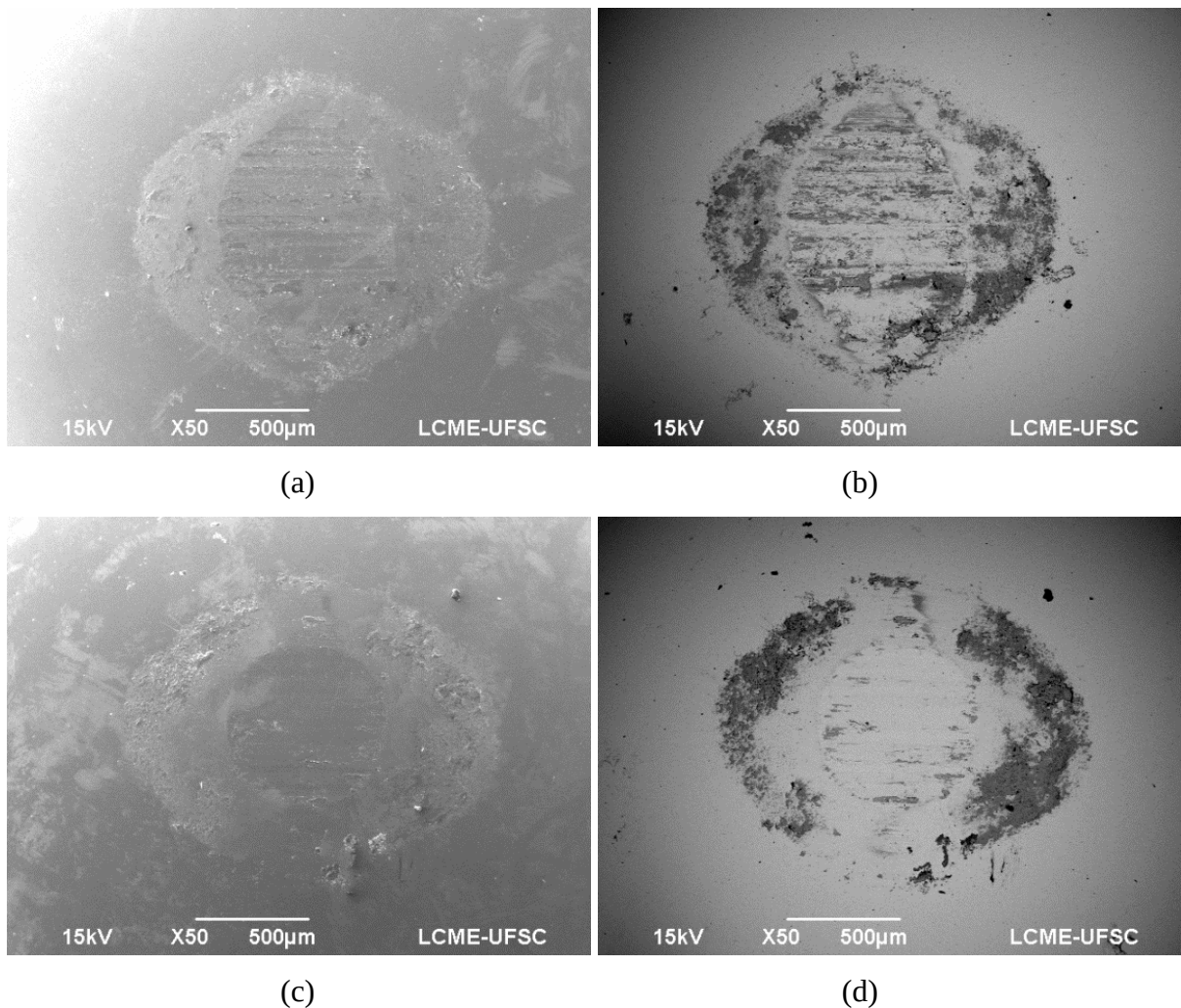


Figura 4.33: Mecanismos de desgaste para os contra corpos. MEV. (a) e (b) Amostra C; (c) e (d) Amostra CM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.

Já as Figuras 4.34 e 4.35 evidenciam com mais detalhes as tribocamadas formadas na superfície dos contra corpos ensaiados. Compreende-se que há regiões mais escuras na superfície destes contra corpos ensaiados para ambas as amostras, onde foi constatada a presença de óxidos de ferro e carbono, mostrados nas análises via EDS, nas Figuras 4.34-c e 4.35-c respectivamente, deixando clara a atuação de desgaste tribo-químico.

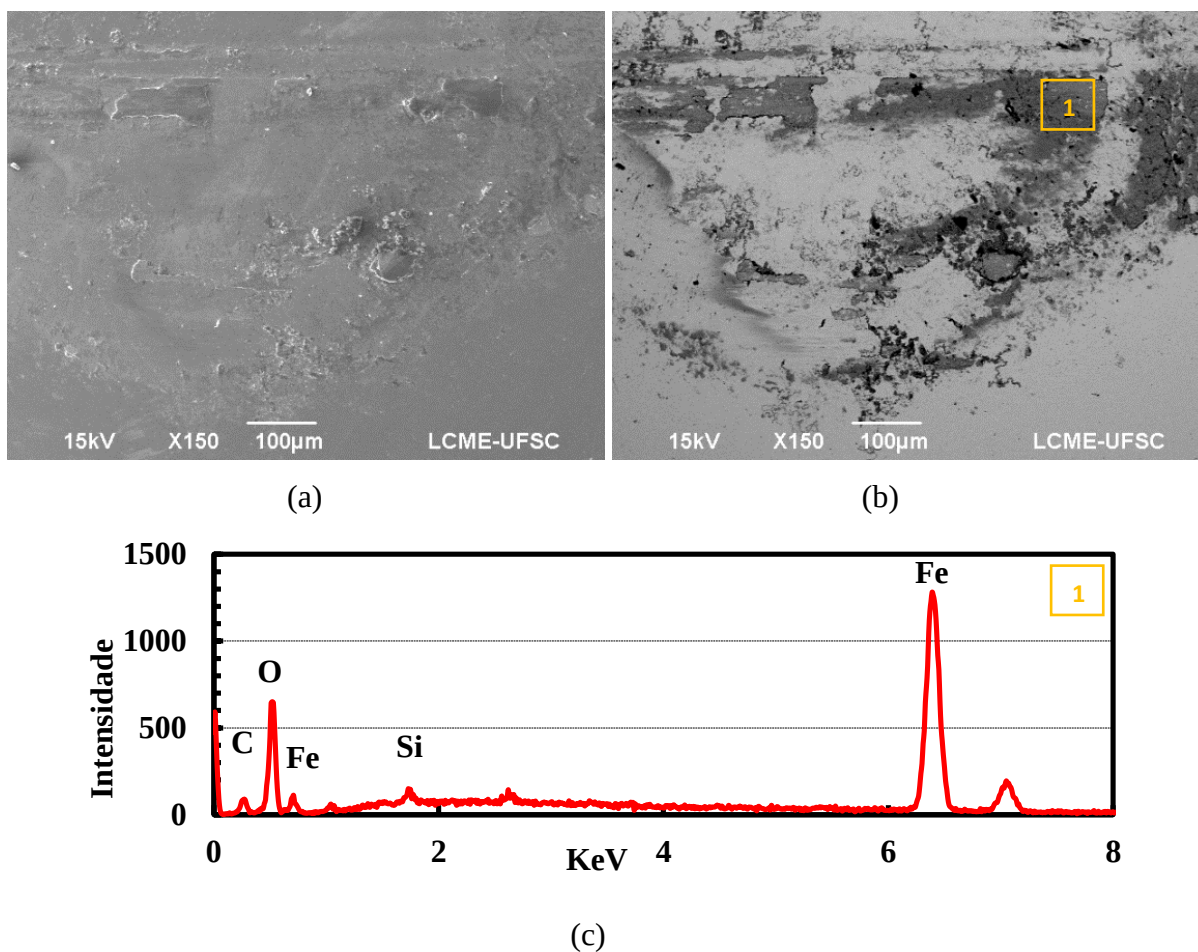


Figura 4.34: Mecanismos de desgaste para o contra corpo da amostra C. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS para a região 1.

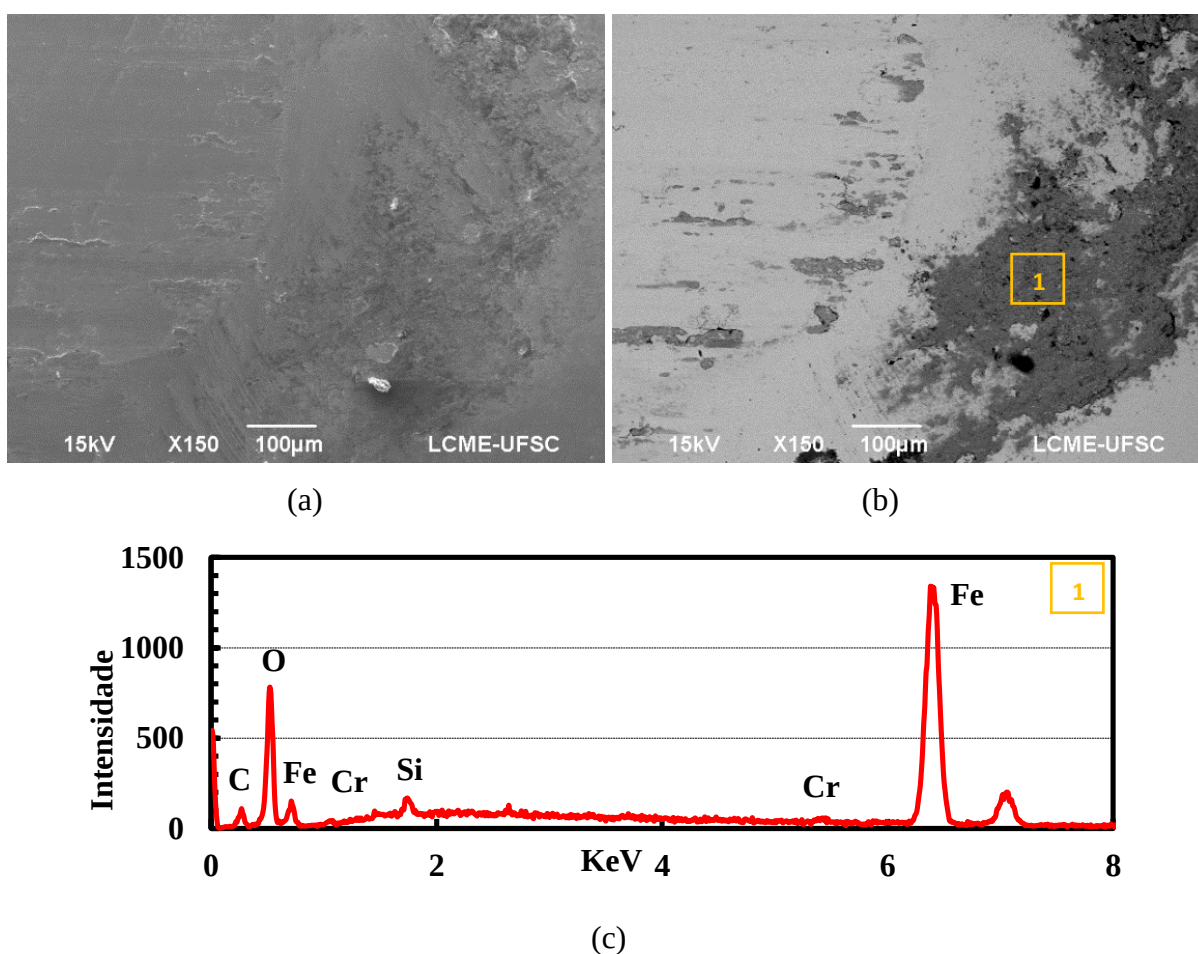


Figura 4.35: Mecanismos de desgaste para o contra corpo da amostra CM. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários, (b) por elétrons retroespalhados, (c) Análise via EDS para a região 1.

4.3.2 – Carga de 13,75 N

Como verificado na Figura 4.23, a amostra P apresentou um coeficiente de atrito médio fora do regime de lubricidade ($\mu > 0,2$). Diante disso fez-se então novos ensaios para as amostras P e PM, a seco, com óleo LAB 240, com a carga normal de 13,75 N e com duração de 2 horas.

A Figura 4.36 situa o coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra, para as amostras P e PM.

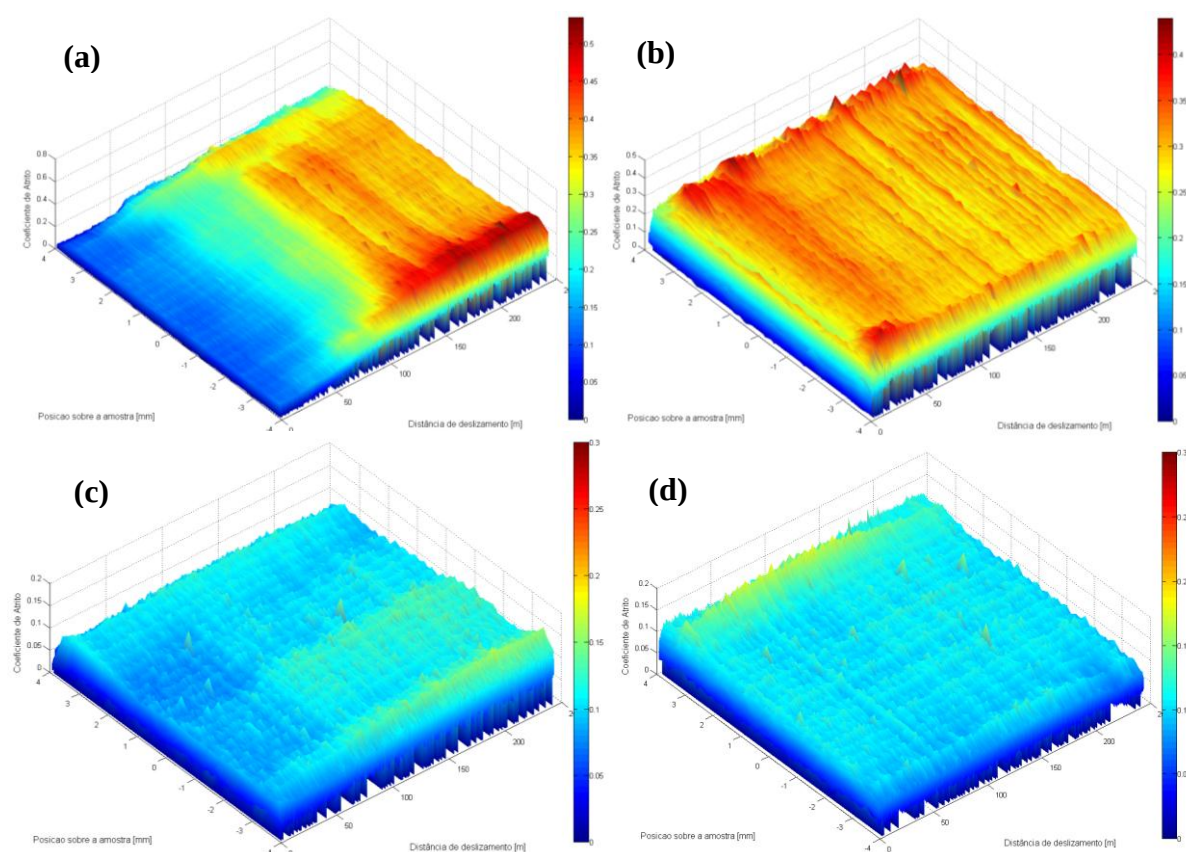


Figura 4.36: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra. (a) e (b) Ensaio seco, ao ar; (c) e (d) Ensaio lubrificado com óleo. À esquerda amostra P e à direita amostra PM.

Percebe-se para a amostra P (Figura 4.36-a), que o coeficiente de atrito começa baixo e segue aumentando ao longo do ensaio, alcançando o seu valor máximo ao fim do ensaio. Identifica-se também um ligeiro aumento no coeficiente de atrito nas extremidades. Ao adicionar óleo no contato (Figura 4.36-c), o coeficiente de atrito reduz significativamente, com pouca flutuação em seu valor durante todo o ensaio.

É observado na amostra PM (Figura 4.36-b), que no início do ensaio, o coeficiente de atrito aparece com um valor maior, e segue decaindo até cerca de 100m deslizados, e logo após permanece praticamente estável durante o restante do ensaio. Verifica-se também um ligeiro aumento nas extremidades. Na Figura 4.36-d, adiciona-se óleo no contato, onde analogamente ao ocorrido com a amostra P, ocorre uma redução significativa no coeficiente de atrito. Nota-se também um leve aumento no coeficiente de atrito em uma das extremidades.

A Figura 4.37 ilustra o coeficiente de atrito médio. Há uma diminuição significativa no coeficiente de atrito quando é adicionado o fluido lubrificante no contato. Observa-se também que quando os dois lubrificantes estão presentes no contato, há uma diminuição no coeficiente de atrito quando comparado com o lubrificante líquido apenas. Isso pode ser explicado pela ação do lubrificante sólido nas extremidades da marca de desgaste onde há o regime de lubrificação misto/limite, que reduz o coeficiente de atrito.

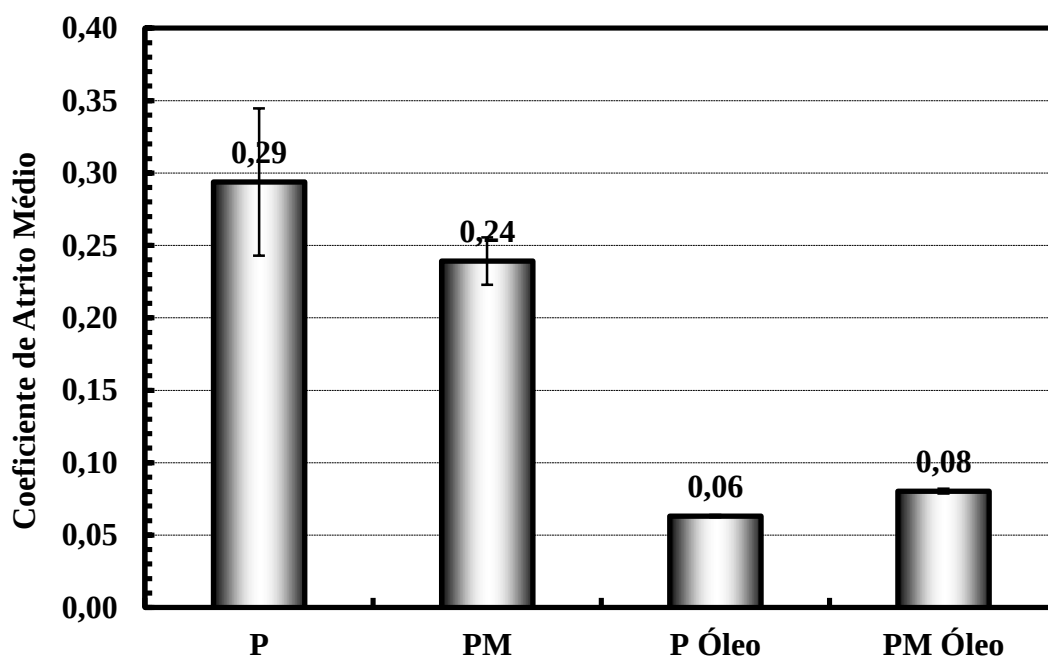


Figura 4.37: Coeficiente de atrito médio para os ensaios efetuados.

A Figura 4.38 representa imagens obtidas via interferometria a laser das amostras P e PM ensaiadas a seco e com óleo, onde se pode observar o aspecto das marcas de desgaste obtidas.

A Figura 4.39 demonstra a taxa de desgaste das amostras P e PM. Observa-se na figura que, para cargas mais baixas, a adição do lubrificante sólido promoveu uma queda na taxa de desgaste (aproximadamente 30%), diferentemente do que aconteceu com a carga mais elevada (Figura 4.25), onde a adição do lubrificante sólido não teve efeito na taxa de desgaste para a amostra P. Quando adicionado o lubrificante líquido no contato juntamente com os lubrificantes sólidos, há uma queda de aproximadamente 50% na taxa de desgaste. Quando adicionado apenas o lubrificante líquido, a queda é ainda maior, chegando a aproximadamente 60%.

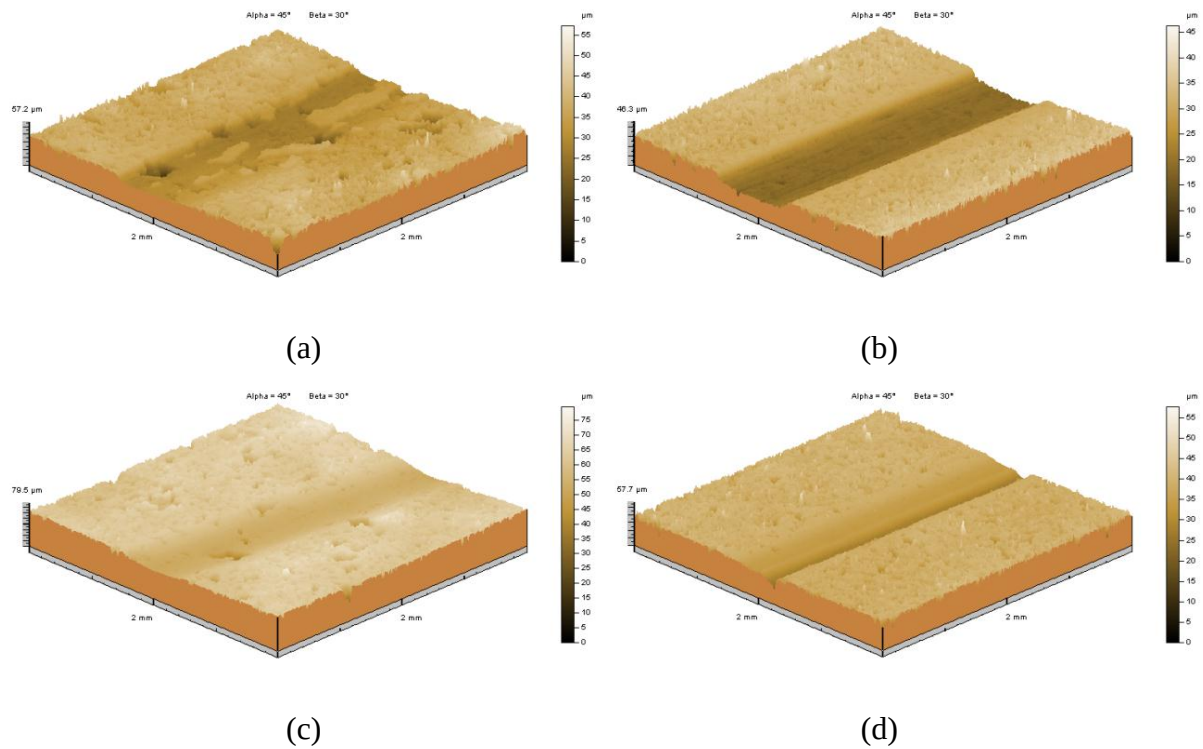


Figura 4.38: Imagens obtidas via interferometria a laser para as amostras: (a) P, (b) PM, (c) P Óleo, (d) PM Óleo.

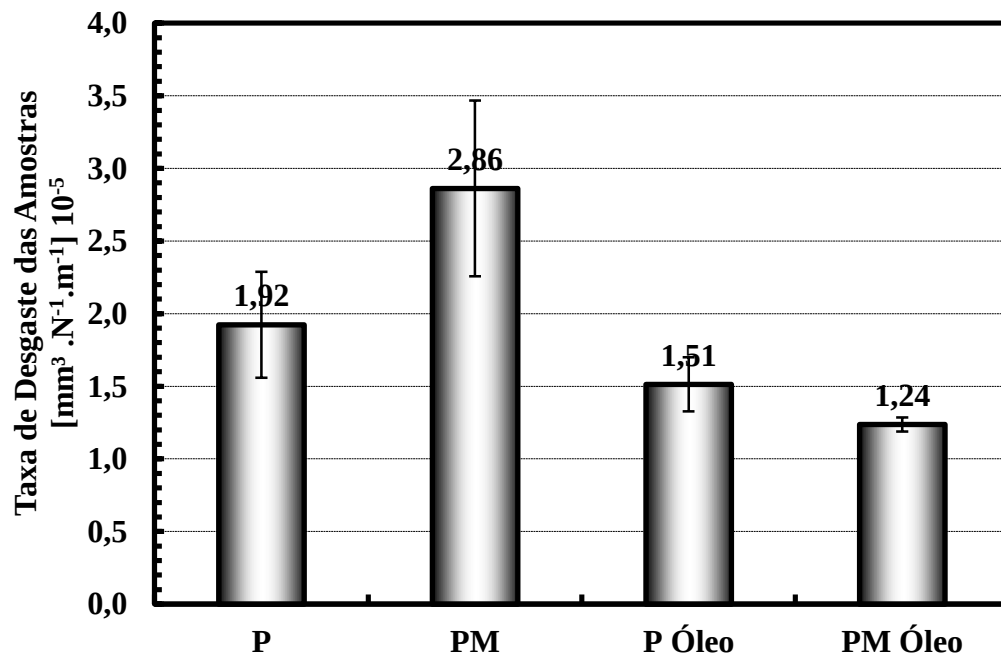


Figura 4.39: Taxa de desgaste para as amostras P e PM.

A Figura 4.40 retrata imagens obtidas por MEV por elétrons retroespalhados para as amostras P e PM ensaiadas a seco, onde se percebe a formação de uma tribocamada na marca de desgaste da amostra P simbolizadas pelas setas brancas e já para a amostra PM quase não há formação de uma tribocamada, visto que esta é bem menos intensa. Adicionalmente, a presença de reservatórios ativos de lubrificantes sólidos é sinalizada pelas setas vermelhas.

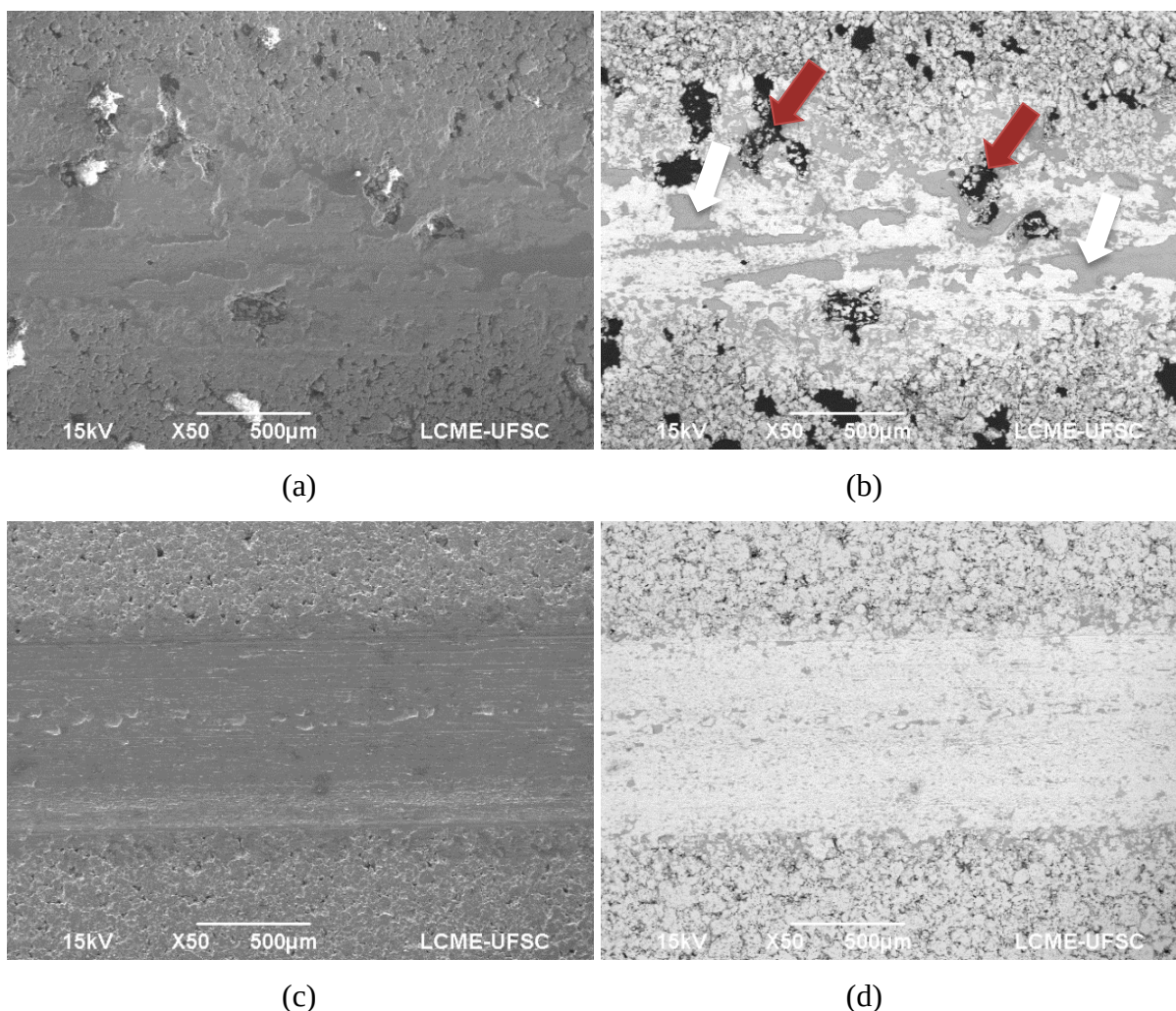


Figura 4.40: Mecanismos de desgaste. MEV. (a) e (b) Amostra P; (c) e (d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.

A Figura 4.41 revela com mais detalhes a superfície da marca de desgaste para as amostras P e PM ensaiadas a seco, onde percebe-se que há regiões lisas de coloração cinza claro, onde foram constatadas via EDS a presença de óxidos de ferro, carbono e cromo, este último possivelmente oriundo do contra corpo, analogamente ao apresentado nas Figuras 4.30 e 4.31.

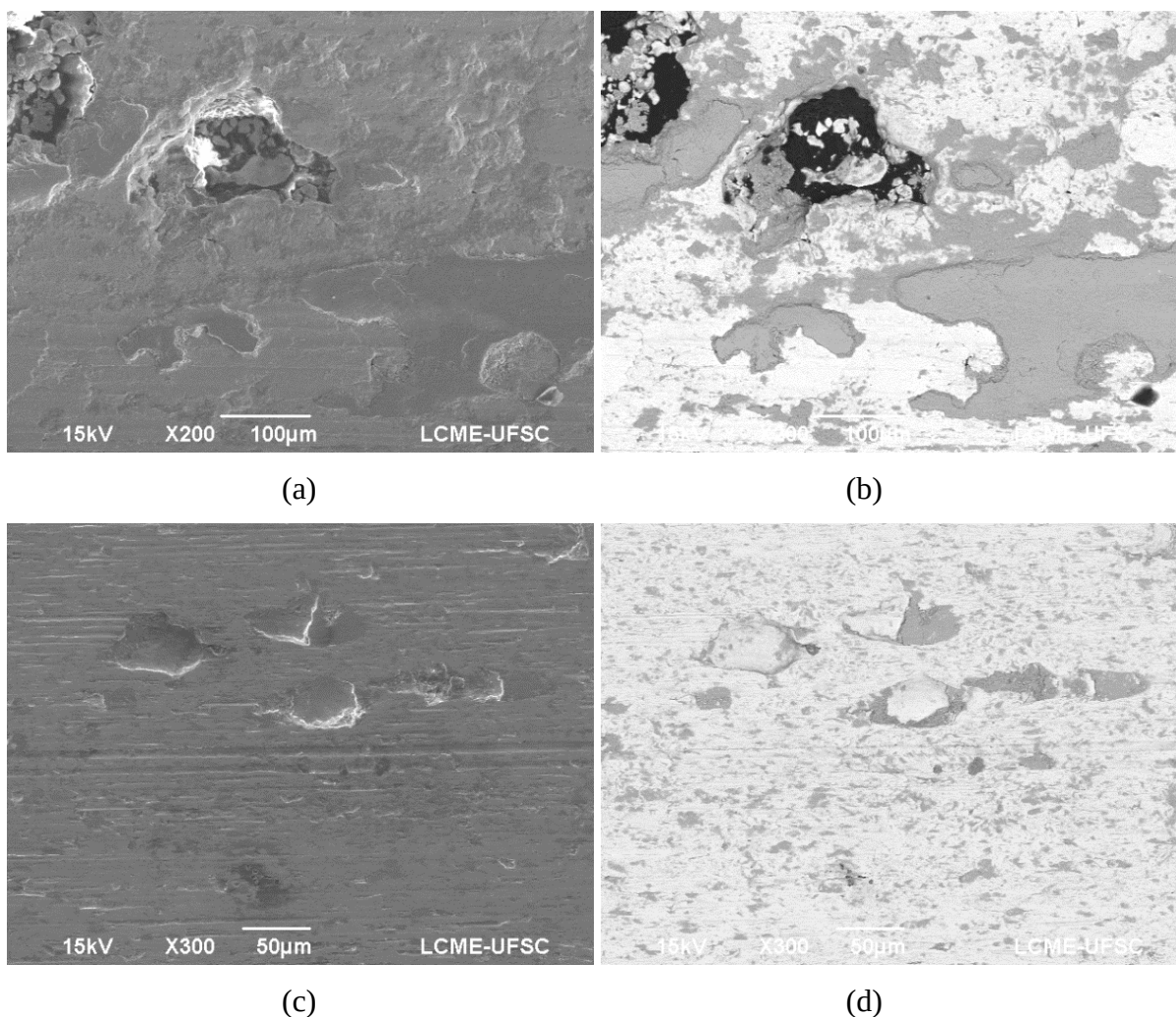


Figura 4.41: Mecanismos de desgaste. MEV. (a) e (b) Amostra P; (c) e (d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.

A Figura 4.42 evidencia imagens para as amostras P e PM ensaiadas com óleo, onde se percebe que, diferentemente do ocorrido no modo seco, não obstante a presença de reservatórios ativos de lubrificantes sólidos, mostrados pela seta branca, parece não haver a formação de uma tribocamada, como mencionado anteriormente para a amostra P. Para a amostra PM, verifica-se que a marca de desgaste da mesma, é aparentemente mais lisa e com poros fechados, diferentemente do ocorrido com a amostra P.

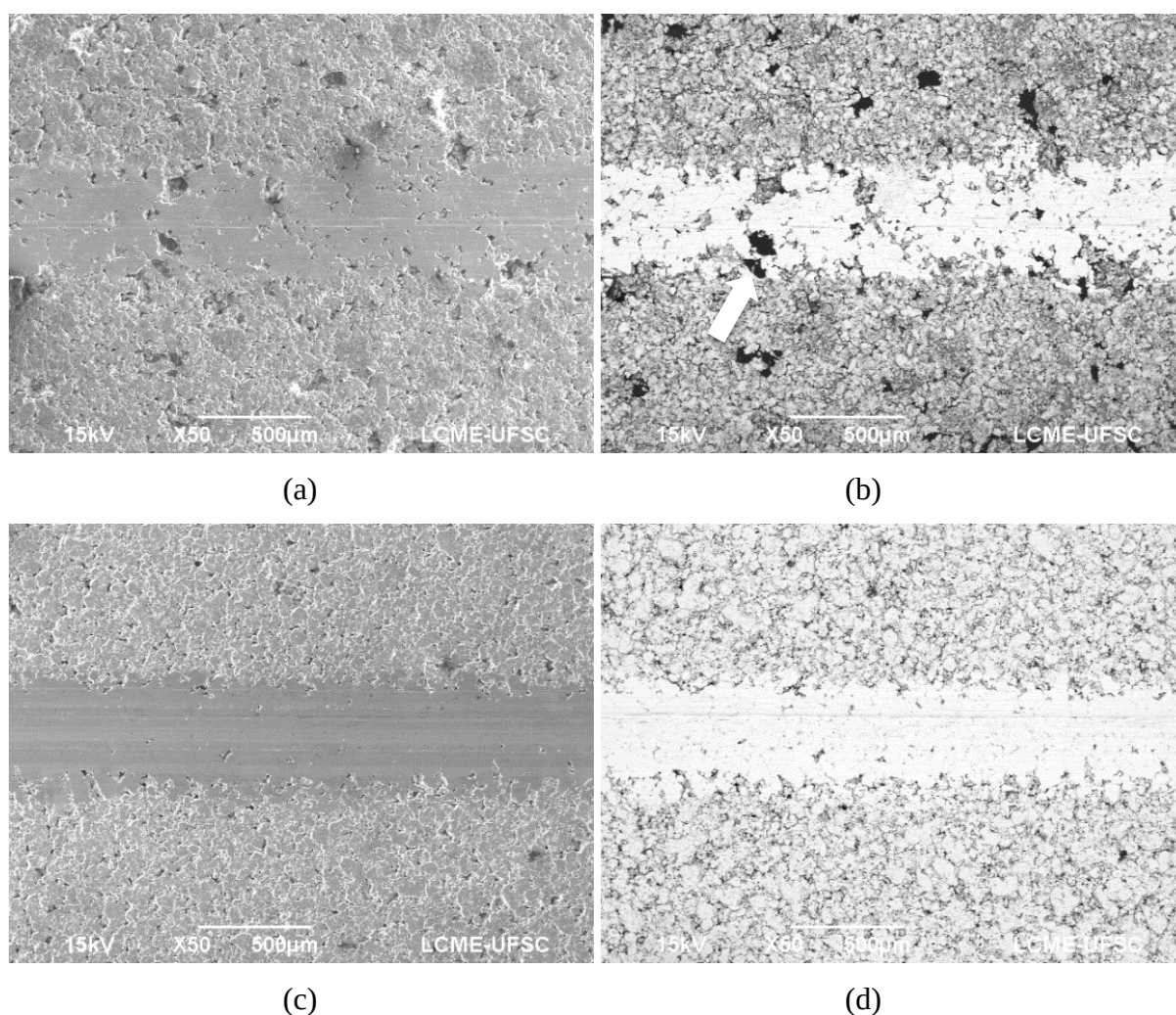


Figura 4.42: Imagens obtidas por MEV das amostras ensaiadas com óleo. a) e b) Amostra P; c) e d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.

A Figura 4.43 descreve com mais detalhes a superfície da marca de desgaste para as amostras P e PM ensaiadas com óleo, onde o óleo lubrificante parece impedir a formação de uma tribocamada de lubrificantes sólidos na superfície da marca de desgaste, diferentemente do que ocorreu durante os ensaios a seco. Percebem-se marcas de abrasão na amostra P, mostradas pelas setas brancas, sugerindo ser a explicação para o maior desgaste apresentado quando lubrificada com os lubrificantes sólidos e líquidos, como mostrado na Figura 4.39.

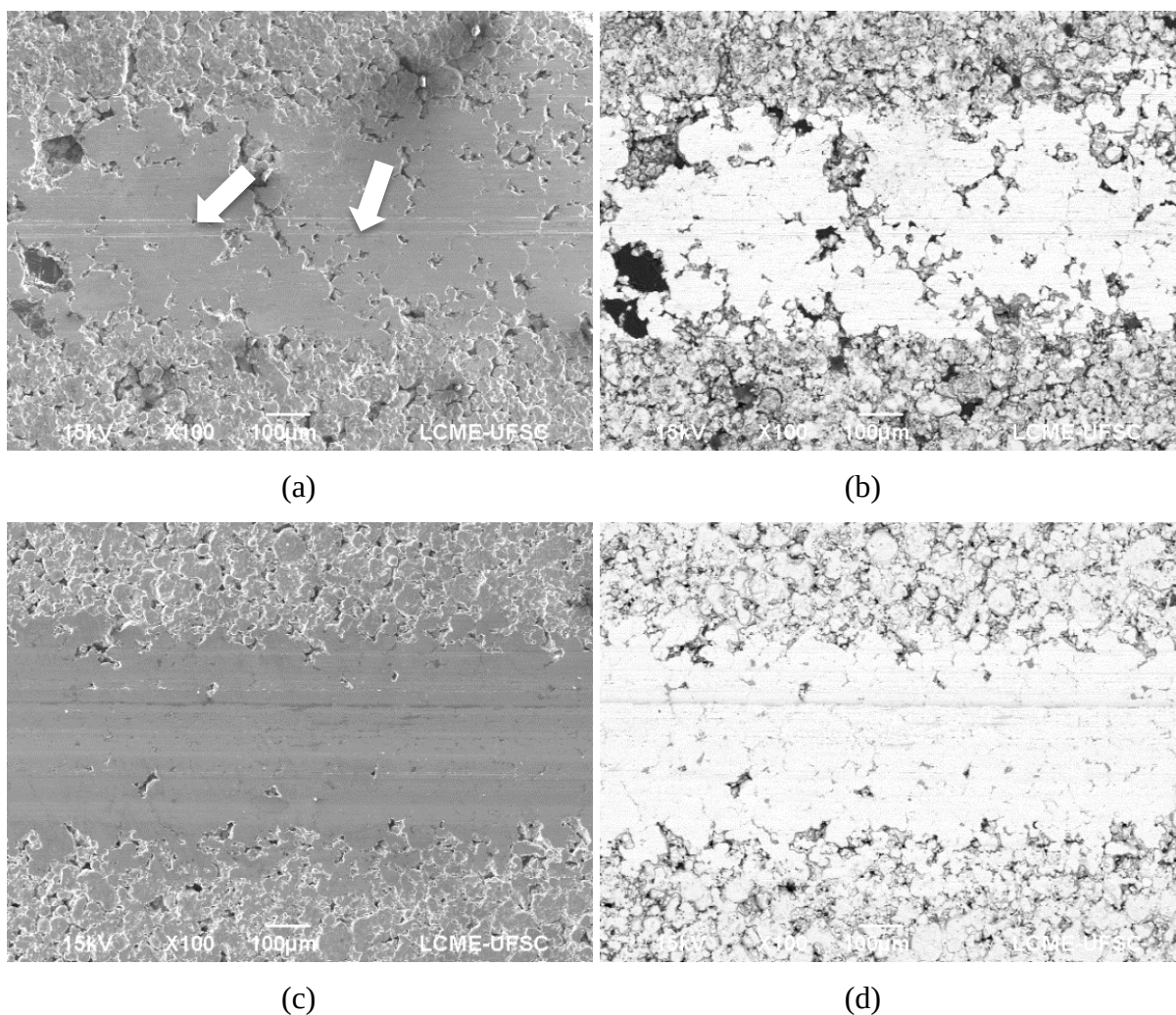


Figura 4.43: Imagens obtidas por MEV das amostras ensaiadas com óleo. a) e b) Amostra P; c) e d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.

A Figura 4.44 aborda a taxa de desgaste para o contra corpo, onde se nota uma diferença significativa na taxa de desgaste do contra corpo (2 ordens de grandeza), quando inserido o óleo no sistema tribológico. Quando comparado somente com o lubrificante líquido, a presença dos lubrificantes sólidos e líquido promoveu uma expressiva redução na taxa de desgaste do contra corpo.

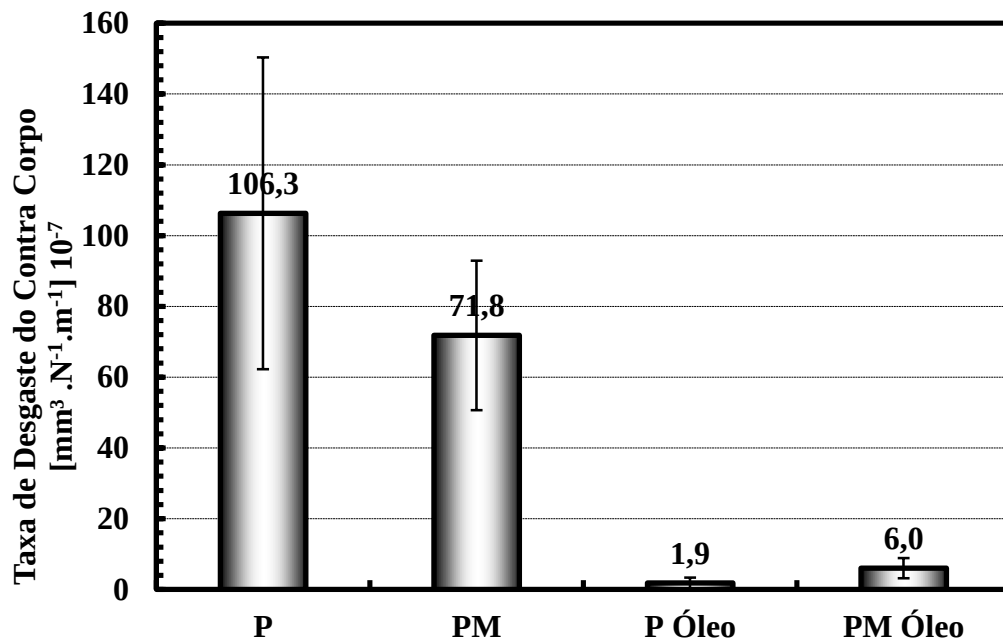


Figura 4.44: Taxa de desgaste do contra corpo para os ensaios efetuados.

A Figura 4.45 mostra imagens obtidas por MEV para os contra corpos ensaiados com as amostras P e PM a seco, que, aparentemente, aparecem resíduos aderidos ao contra corpo para ambas as amostras.

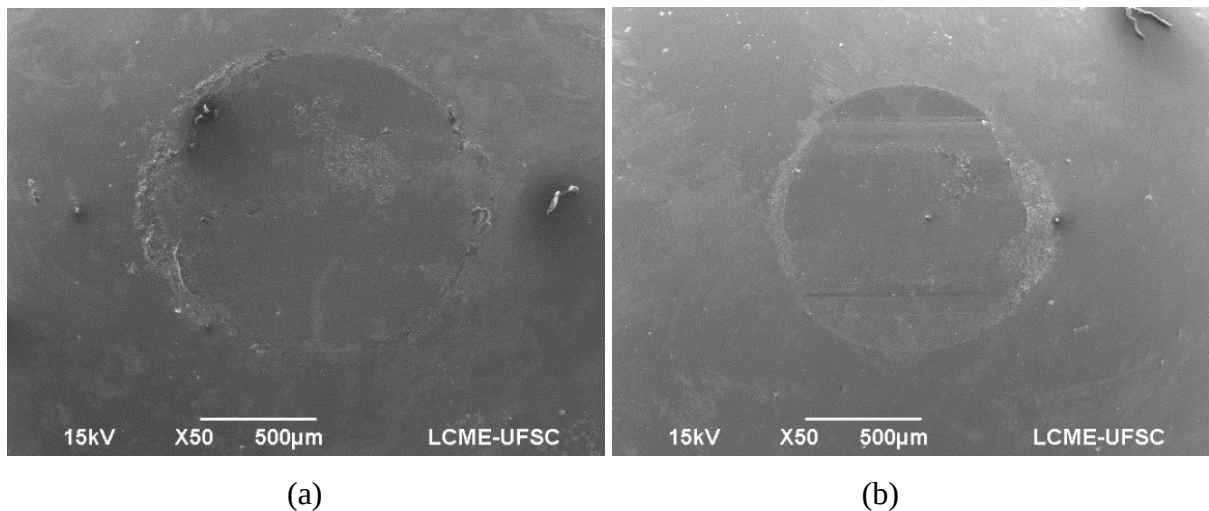


Figura 4.45: Imagens obtidas por MEV produzidas por elétrons secundários para os contra corpos ensaiados na condição de seco para as amostras: a) P e b) PM.

A Figura 4.46 ilustra com mais detalhes os resíduos aderidos na superfície dos contra corpos ensaiados a seco. Percebe-se que há regiões mais escuras para os contra corpos ensaiados com a amostra P e PM, onde foi constatada a presença de óxidos de ferro e carbono

via EDS, que provavelmente são oriundos da amostra e aderiram à superfície do contra corpo durante o ensaio.

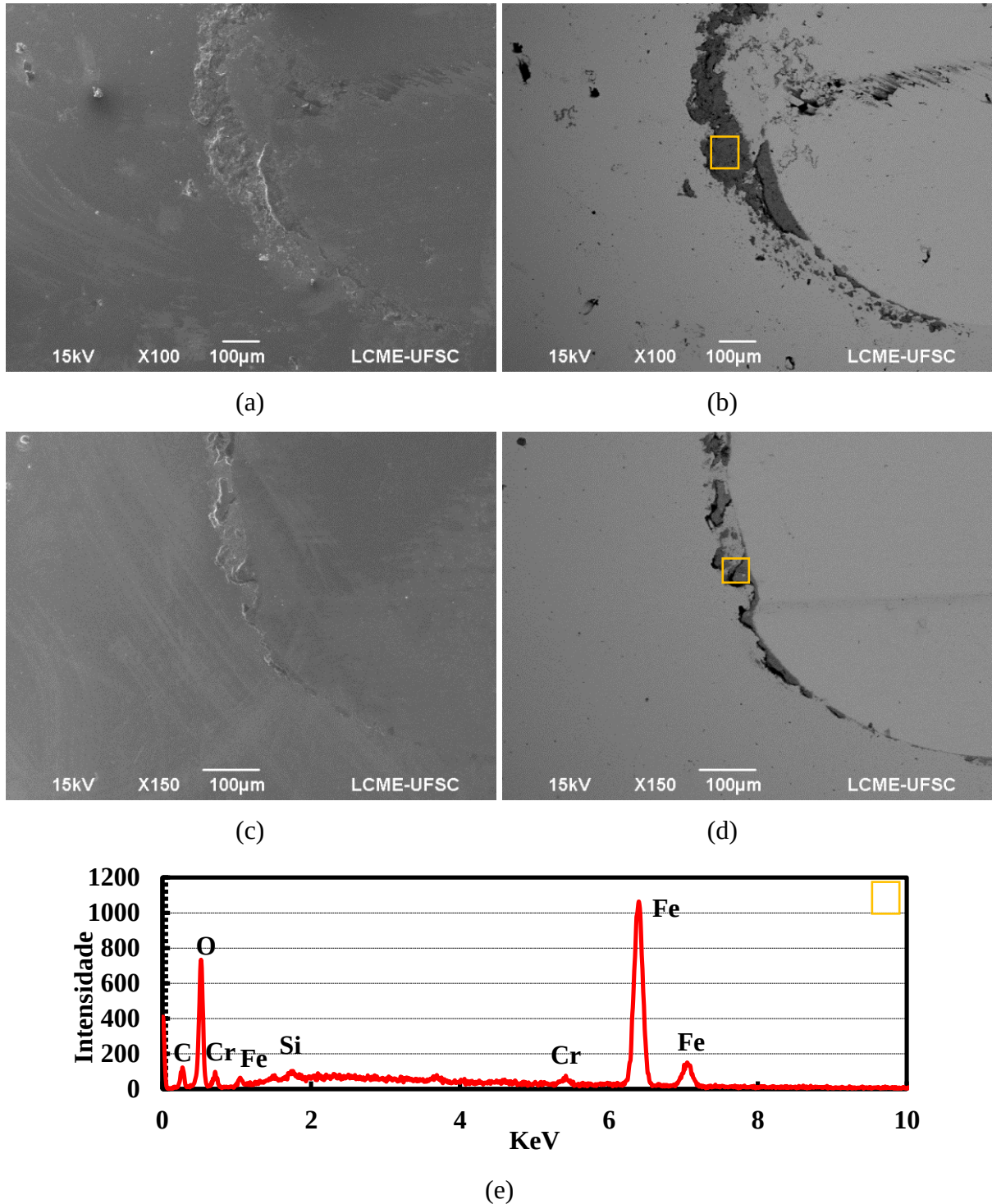


Figura 4.46: Mecanismos de desgaste para os contra corpos. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários para a amostra P, (b) por elétrons retroespalhados para a amostra P, (c) por elétrons secundários para a amostra PM, (d) por elétrons retroespalhados para a amostra PM (e) EDS típica.

Por fim, a Figura 4.47 apresenta imagens obtidas por MEV para os contra corpos ensaiados com óleo para as amostras P e PM. Observa-se que, diferentemente das amostras ensaiadas a seco, não houve a adesão de outras partículas na superfície da marca de desgaste. Percebe-se marcas de abrasão no contra corpo da amostra P, sinalizadas pelas setas brancas, como também apresentadas pela amostra P, reforçando a sugestão da explicação para o maior desgaste apresentado quando lubrificada com os lubrificantes sólidos e líquidos, como verificado nas Figuras 4.39 e 4.43.

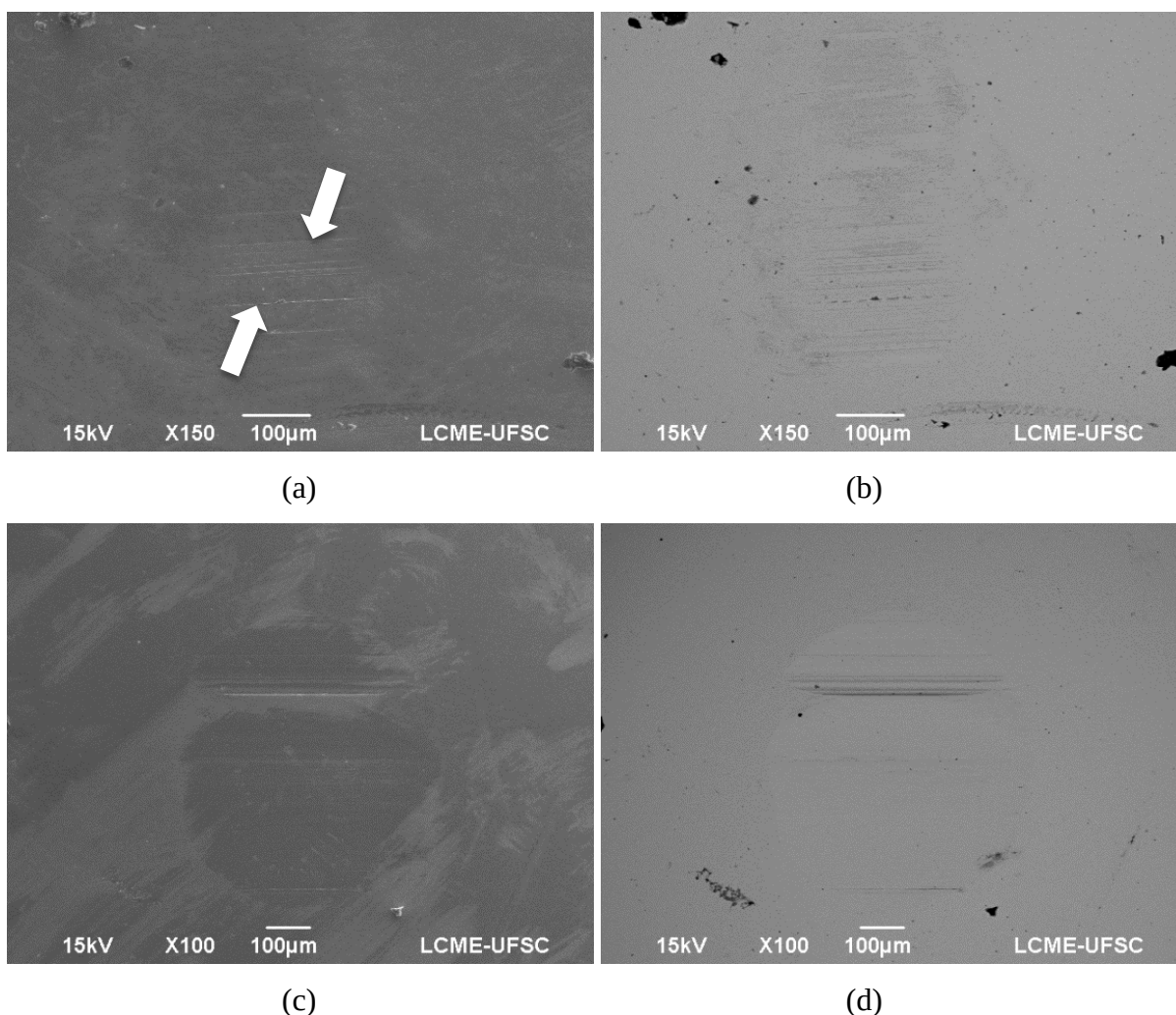


Figura 4.47: Mecanismos de desgaste para os contra corpos. MEV. (a) e (b) Amostra P; (c) e (d) Amostra PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.

CAPÍTULO V

Conclusões

1. A utilização simultânea de lubrificantes sólidos e líquidos produz uma diminuição significativa no coeficiente de atrito (25%) quando comparado com a adição do lubrificante líquido apenas, sugerindo a existência de uma sinergia positiva entre os lubrificantes sólidos e líquidos. Esta ação conjunta aumenta significativamente a durabilidade do regime de lubricidade do sistema ($\mu < 0.2$) (3 ordens de grandeza), reduz o coeficiente de atrito (cerca de 4x) e a taxa de desgaste em 50%.
2. A lubrificação líquida utilizada isoladamente exerce uma grande influência no comportamento tribológico e governa o processo deixando um papel coadjuvante para os outros fatores. Neste sentido, existe um aumento significativo da durabilidade do regime de lubricidade (3 ordens de grandeza). Adicionalmente, para as ligas martensíticas, o atrito diminui 300% e a taxa de desgaste é reduzida em 230 %.
3. A utilização isolada de lubrificantes sólidos aumenta em até 3 ordens de grandeza a durabilidade do sistema devido à formação de uma tribocamada provavelmente proveniente dos reservatórios ativos de lubrificantes sólidos no interior das marcas de desgaste, bem como, em função da natureza da matriz metálica, exerce influência tanto no coeficiente de atrito quanto na taxa de desgaste (um aumento de 400% para as amostras ferrito-perlíticas e uma redução em cerca de 30% para as ligas martensíticas).
4. A variação da estrutura da matriz proporcionou uma diferença de até uma ordem de grandeza na durabilidade, uma significativa variação (até 30%) no coeficiente de atrito a seco e uma significativa influência na taxa de desgaste: cerca de 1000% para as ligas contendo lubrificantes sólidos e cerca de 260% para as ligas matriz.

5. A taxa de desgaste dos contra corpos foi influenciada por diversos parâmetros tribológicos, mas mostrou-se bastante inferior (em até duas ordens de grandeza) àquelas das amostras, não exercendo, portanto, efeito significativo no desgaste do tribo-par.
6. A utilização da técnica triboscópica possibilitou, de uma maneira original, constatar um significativo aumento do coeficiente de atrito nas extremidades das marcas de desgaste das ligas ferrito-perlíticas. Esta variação do coeficiente de atrito com a posição foi discutida em termos do acúmulo de debris e da mudança do regime de lubrificação, associados com a dinâmica do movimento alternativo, tendo sido atribuído um papel preponderante ao primeiro.

CAPÍTULO VI

Trabalhos Futuros

Sugere-se como trabalho futuro o estudo sistemático das causas efetivas do aumento do coeficiente de atrito nas extremidades da marca de desgaste. Focar-se-á, em particular, no efeito do acúmulo de debris e na mudança do regime de lubrificação, associados com a dinâmica do movimento alternativo.

CAPÍTULO VI

Referências Bibliográficas

AHN, H.-S.; KIM, J.-Y.; LIM, D.-S. Tribological behaviour of plasma-sprayed zirconia coatings. **Wear**, v. 203–204, n. 0, p. 77-87, 1997. ISSN 0043-1648.

BELIN, M. Triboscopy: A new quantitative tool for microtribology. **Wear**, v. 168, n. 1–2, p. 7-12, 1993. ISSN 0043-1648.

BELIN, M.; LOPEZ, J.; MARTIN, J. M. Triboscopy, a quantitative tool for the study of the wear of a coated material. **Surface and Coatings Technology**, v. 70, n. 1, p. 27-31, 1994. ISSN 0257-8972.

BINDER, C. **Desenvolvimento de novos tipos de aços sinterizados auto lubrificantes a seco com elevada resistência mecânica aliada a baixo coeficiente de atrito via moldagem de pós por injeção**. 2009. 170 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BINDER, C.; HAMMES, G.; SCHROEDER, R.; KLEIN, A. N.; DE MELLO, J. D. B.; BINDER, R.; JUNIOR, W. R. ‘Fine tuned’ steels point the way to a focused future. **Metal Powder Report**, v. 65, n. 4, p. 29-37, 2010. ISSN 0026-0657.

BINDER, R.; KLEIN, A. N.; BINDER, C.; G.HAMMES; PARUCKER, M. L.; JR., W. R. **Composição metalúrgica de materiais particulados, produto sinterizado autolubrificante e processo de obtenção de produtos sinterizados autolubrificantes**. INPI. Brazil. PI 0803956-9 2008.

BOZZI, A. C.; DE MELLO, J. D. B. In: 61º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2006. Rio de Janeiro - RJ. Anais do 61º Congresso Anual da ABM. **Triboscopia: Princípios**

potencialidades da técnica e aplicação em ensaios de desgaste por deslizamento. p.4010-4018.

CHEN, Q.; LI, D. Y.; COOK, B. Is porosity always detrimental to the wear resistance of materials?—A computational study on the effect of porosity on erosive wear of TiC/Cu composites. **Wear**, v. 267, n. 5–8, p. 1153-1159, 2009. ISSN 0043-1648.

CLAUSS, F. J. **Solid Lubricants and Self-lubricating Solids**. New York: Academic Press, 1972.

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. ISSN 0043-1648.

DANGSHENG, X. Lubrication behavior of Ni–Cr-based alloys containing MoS₂ at high temperature. **Wear**, v. 251, n. 1–12, p. 1094-1099, 2001. ISSN 0043-1648.

DE MELLO, J. D. B. Influence of Surface Topography on the Surface Durability of Steam Oxidised Sintered Iron. **Materials Research**, v. 8, p. 135-141, 2005.

DE MELLO, J. D. B.; BINDER, C.; BINDER, R.; KLEIN, A. N. Effect of precursor content and sintering temperature on the scuffing resistance of sintered self lubricating steel. **Wear**, v. 271, n. 9–10, p. 1862-1867, 2011. ISSN 0043-1648.

DE MELLO, J. D. B.; BINDER, C.; HAMMES, G.; KLEIN, A. N. Effect of the metallic matrix on the sliding wear of plasma assisted debinded and sintered MIM self-lubricating steel. **Wear**, n. 0, 2013a. ISSN 0043-1648.

DE MELLO, J. D. B.; BINDER, C.; HAMMES, G.; SCHROEDER, R.; KLEIN, A. N. In: WORLD TRIBOLOGY CONGRESS, 2013b. Torino, Italy. **Iron based self-lubricating sintered composites**.

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. ISSN 0301-679X.

DE MELLO, J. D. B.; BINDER, R.; DEMAS, N. G.; POLYCARPOU, A. A. Effect of the actual environment present in hermetic compressors on the tribological behaviour of a Si-rich multifunctional DLC coating. **Wear**, v. 267, n. 5–8, p. 907-915, 2009. ISSN 0043-1648.

DE MELLO, J. D. B.; BINDER, R.; KLEIN, A. N.; HUTCHINGS, I. M. Effect of compaction pressure and powder grade on microstructure and hardness of steam oxidised sintered iron. **Powder Metallurgy**, v. 44, n. 1, p. 53-61, 2001.

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. ISSN 0043-1648.

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

_____. Surface durability of steam-oxidized sintered iron: effect of surface topography. In: (Ed.). **Tribology 2001**. Vienna: Austrian Tribology Society, 2001b. p.105-112. ISBN 390165707X.

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. ISSN 0043-1648.

_____. 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. ISSN 0043-1648.

_____. 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. ISSN 0043-1648.

DONNET, C.; ERDEMIR, A. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 180–181, n. 0, p. 76-84, 2004. ISSN 0257-8972.

DUBRUJEAUD, B.; VARDAVOULIAS, M.; JEANDIN, M. The role of porosity in the dry sliding wear of a sintered ferrous alloy. **Wear**, v. 174, n. 1–2, p. 155-161, 1994. ISSN 0043-1648.

ERDEMIR, A. In: BHUSHAN, B. (Ed.). **Modern Tribology Handbook**: CRC Press, v.II, 2001. p.787–825.

_____. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. **Tribology International**, v. 38, n. 3, p. 249-256, 2005. ISSN 0301-679X.

ERDEMIR, A.; MARTIN, J.-M. Introduction. In: ALI, E. e JEAN-MICHEL, M. (Ed.). **Superlubricity**. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2007. p.xvii-xix. ISBN 978-0-444-52772-1.

GERMAN, R. M. **Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing: The Processes, Materials, Products, Properties, and Applications**. Metal Powder Industries Federation, 2005.

GERMAN, R. M.; PARK, S. J. **Handbook of Mathematical Relations in Particulate Materials Processing**. John Wiley & Sons, 2009.

GSCHWENDER, L. J.; KRAMER, D. C.; LOK, B. K.; SHARMA, S. K.; SNYDER JR., C. E.; SZTENDEROWICZ, M. L. Modern Tribology Handbook. In: BHUSHAN, B. (Ed.): CRC Press, v.I, 2001. p.351–372.

HAMMES, G.; SCHROEDER, R.; BINDER, C.; KLEIN, A. N.; MELLO, J. D. B. D. Effect of Double Pressing/Double Sintering on the Sliding Wear of Self-lubricating Sintered Composites. **Elsevier Editorial System(tm) for Tribology International**, 2013.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. CRC Press, 1992.

ISO 4287. **Surface Texture: Profile Method – Terms, Definitions and Surface Texture Parameters**. Geometrical Product Specifications (GPS) International Standard ISO 4287 1997.

JACOBSON, S.; HOGMARK, S. Surface modifications in tribological contacts. **Wear**, v. 266, n. 3–4, p. 370-378, 2009. ISSN 0043-1648.

KATO, H.; TAKAMA, M.; IWAI, Y.; WASHIDA, K.; SASAKI, Y. Wear and mechanical properties of sintered copper–tin composites containing graphite or molybdenum disulfide. **Wear**, v. 255, n. 1–6, p. 573-578, 2003. ISSN 0043-1648.

KLEIN, A. N.; BINDER, C.; HAMMES, G.; MELLO, J. D. B. D.; JR, W. R.; R.BINDER. In: PROCEEDINGS OF EURO PM2009, 2009. **Self lubricating sintered steels with high mechanical resistance obtained via in situ formation of solid lubricant particles during sintering**. p.191–196.

LANCASTER, J. K. Solid lubricants. In: BOOSER, E. R. (Ed.). **CRC Handbook of Lubrication: Theory and Practice of Tribology**. Boca Raton: CRC Press, v.II, 1984. p.269-290.

LANCASTER, J. K. A review of the influence of environmental humidity and water on friction, lubrication and wear. **Tribology International**, v. 23, n. 6, p. 371-389, 1990. ISSN 0301-679X.

LANSDOWN, A. R. **Molybdenum Disulphide Lubrication**.Amsterdan: Elsevier, 1999.

LIPP, A.; SCHWETZ, K. A.; HUNOLD, K. Hexagonal boron nitride: Fabrication, properties and applications. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 5, n. 1, p. 3-9, 1989. ISSN 0955-2219.

MCMURTREY, E. L. **Lubrication Handbook for the Space Industry**.Part A. Solid Lubricants NASA TM-86556, 1985.

PAULEAU, Y.; THIÈRY, F. Deposition and characterization of nanostructured metal/carbon composite films. **Surface and Coatings Technology**, v. 180–181, n. 0, p. 313-322, 2004. ISSN 0257-8972.

PAVANATI, H. C.; STRAFFELINI, G.; MALISKA, A. M.; KLEIN, A. N. Dry sliding of plasma-sintered iron—The influence of nitriding on wear resistance. **Wear**, v. 265, n. 3–4, p. 301-310, 2008. ISSN 0043-1648.

RAPOPORT, L.; FELDMAN, Y.; HOMYONFER, M.; COHEN, H.; SLOAN, J.; HUTCHISON, J. L.; TENNE, R. Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship. **Wear**, v. 225–229, Part 2, n. 0, p. 975-982, 1999. ISSN 0043-1648.

ROHATGI, P. K.; RAY, S.; LIU, Y. Tribological properties of metal matrix-graphite particle composites. **International Materials Reviews**, v. 37, n. 1, p. 129-152, 1992.

SCHROEDER, R.; HAMMES, G.; BINDER, C.; KLEIN, A. N.; MELLO, J. D. B. D. In: 3RD INTERNATIONAL TRIBOLOGY SYMPOSIUM OF IFToMM, 2013. Luleå, Sweden. **Effect of Double Pressing/Double Sintering on the Sliding Wear of Self-lubricating Sintered Composites**.

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. ISSN 0043-1648.

SLINEY, H. E. Solid lubricant materials for high temperatures—a review. **Tribology International**, v. 15, n. 5, p. 303-315, 1982. ISSN 0301-679X.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 3rd Edition. Butterworth Heinemann, 2005.

SUH, N. P.; SIN, H. C. The genesis of friction. **Wear**, v. 69, n. 1, p. 91-114, 1981. ISSN 0043-1648.

SUTOR, P. Solid lubricants: overview and recent developments. **MRS Bull**, v. 16, p. 24-30, 1991.

TAYLOR HOBSON, P. Guide to surface texture parameters. 2000.