

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE LIGAS AUTOLUBRIFICANTES NA PRESENÇA DE UM LUBRIFICANTE LÍQUIDO*

Mário Martins de Oliveira Júnior¹

Cristiano Binder²

Aloisio Nelmo Klein³

José Daniel Biasoli de Mello⁴

Resumo

Na maioria das aplicações tribológicas, lubrificantes líquidos ou graxas 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 este controle. 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. 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 alternado. 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 reduz o coeficiente de atrito (cerca de 4x) e a taxa de desgaste em 50%.

Palavras-chave: Ligas autolubrificantes; Lubrificação fluida; Sinergia; Triboscopia.

TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF SELF-LUBRICATING ALLOYS IN PRESENCE OF A LIQUID LUBRICANT

Abstract

In most tribological applications, liquid lubricants or greases are used to reduce friction and wear. However, when 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. 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%.

Keywords: Self-lubricating alloys; Liquid lubrication; Synergy; Triboscopy.

¹ Engenheiro Mecânico, MsC, Bolsista, Doutorando do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Químico, Dr., Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

³ Físico, Dr., Professor titular, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico, Dr., Professor Titular Emérito, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de diminuir o atrito e o desgaste nos pares tribológicos, faz-se a adição 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 lubrificidade 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 [1].

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 [2].

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 conseqüentemente o desgaste.

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 para controlar o atrito e o desgaste em sistemas modernos com alta eficiência energética [3-6].

A metalurgia do pó é uma técnica atrativa e competitiva para a produção de tais compósitos, devido ao seu baixo custo quando aplicada em larga escala e também por sua grande versatilidade na adequação da técnica para aplicar e adaptar a microestrutura de acordo com as exigências de cada aplicação. A 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, resultam em uma melhoria significativa nos desempenhos mecânicos e tribológicos dos componentes [7,8].

Este trabalho visa estudar o efeito conjunto da lubrificação sólida (compósitos sinterizados contendo partículas de lubrificante sólido dispersos em uma matriz metálica) com a adição de um lubrificante líquido em regime de lubrificação conjunta em uma configuração de desgaste por deslizamento alternado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A matriz dos compostos utilizados neste trabalho foi baseada em uma liga Fe-1,4%Mo-1,0%Si-0,8%C, com e sem adição de lubrificantes sólidos, chamadas de P e PM respectivamente. Para a liga P foram adicionados como lubrificantes sólidos 2,5% de grafite e 5% de nitreto hexagonal de boro (hBN). A rota de processamento está bem escrita em [9].

Os ensaios tribológicos foram efetuados em um Tribômetro Universal Plint®, modelo TE 67 Plint and Partners LDT no modo alternado, com duração de 2 horas e carga normal de 13,75N. Como contra corpo foram utilizadas esferas de aço AISI 52100 com 5 mm de diâmetro.

Para este sistema em particular, 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 1-a mostra o modelo esquemático do teste. A aquisição de dados foi feita por uma placa de aquisição ligada a um microcomputador com o software LabVIEW®, onde foi feito um programa para tratamento dos dados adquiridos. A análise dos dados foi feita utilizando-se de uma técnica denominada triboscopia, que consiste fundamentalmente na produção de imagens numéricas 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. Fez-se uma rotina de programação no software MATLAB® para a confecção das imagens triboscópicas.

Na Figura 1-b um dos eixos mostra a posição sobre a amostra, ou seja, sobre a trilha de desgaste em cada ciclo do movimento alternado, onde cada ciclo é representado por duas linhas na imagem triboscópica, onde uma representa a ida e a outra a volta, e em seguida, a próxima linha representa a ida do próximo ciclo e assim sucessivamente, formando a imagem triboscópica. Outro eixo mostra o número de ciclos, e, por fim, o último eixo, na posição vertical, mostra o coeficiente de atrito em função dos dois primeiros. Observando a escala de cores, percebe-se que para as cores frias (tons de azul e verde) o coeficiente de atrito apresenta valores mais baixos. Já para as cores mais quentes (tons de amarelo e vermelho) o coeficiente de atrito apresenta valores mais altos.

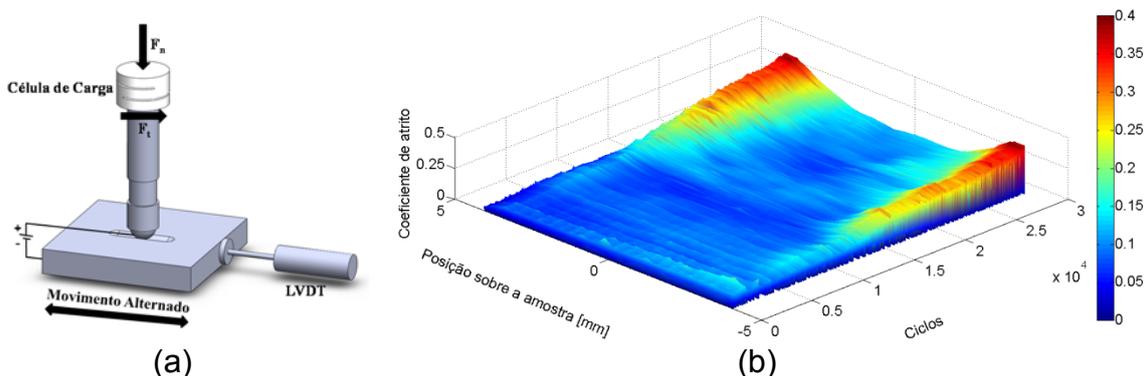


Figura 1. Testes tribológicos. (a) Modelo esquemático do teste. (b) Exemplo de uma imagem triboscópica 3D [10].

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 (11-13).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra o coeficiente de atrito em função do número de ciclos e da posição sobre a amostra, para as ligas P e PM.

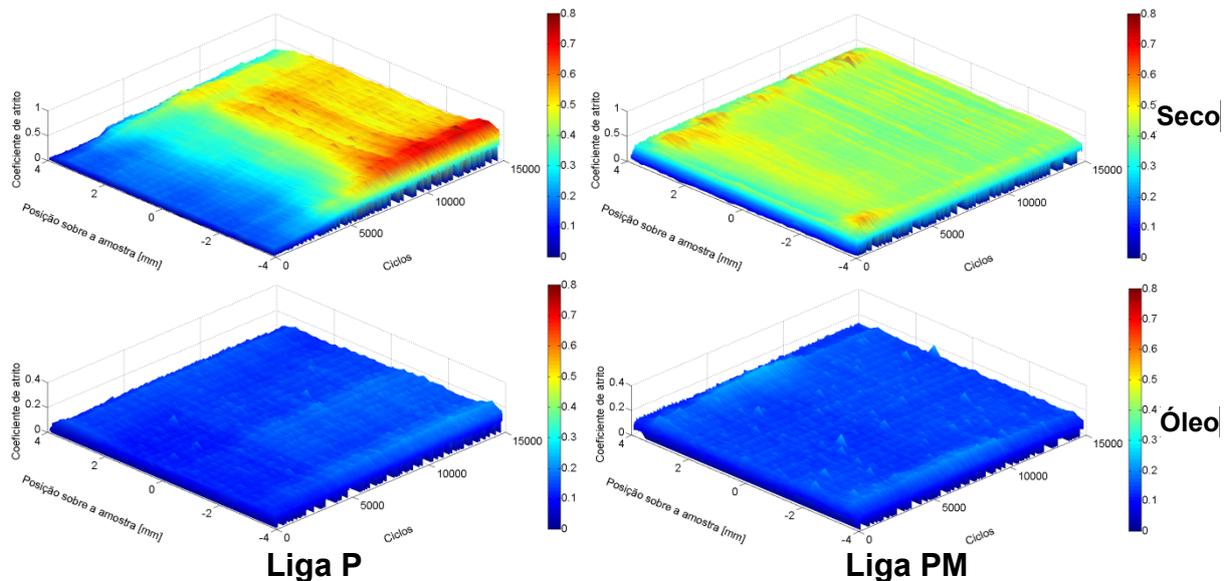


Figura 2. Coeficiente de atrito em função do número de ciclos e da posição sobre a amostra.

Percebe-se para a liga P (Figura 2-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 2-c), o coeficiente de atrito reduz significativamente, com pouca flutuação em seu valor durante todo o ensaio.

É observado na liga PM (Figura 2-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 2-d, adiciona-se óleo no contato, onde analogamente ao ocorrido com a liga 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 3 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.

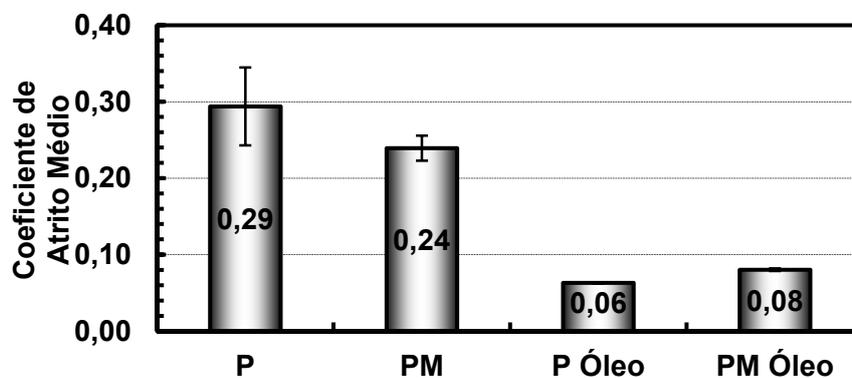


Figura 3. Coeficiente de atrito médio.

A Figura 4 representa imagens obtidas via interferometria a laser das ligas P e PM ensaiadas a seco e com óleo, onde se pode observar o aspecto das marcas de desgaste.

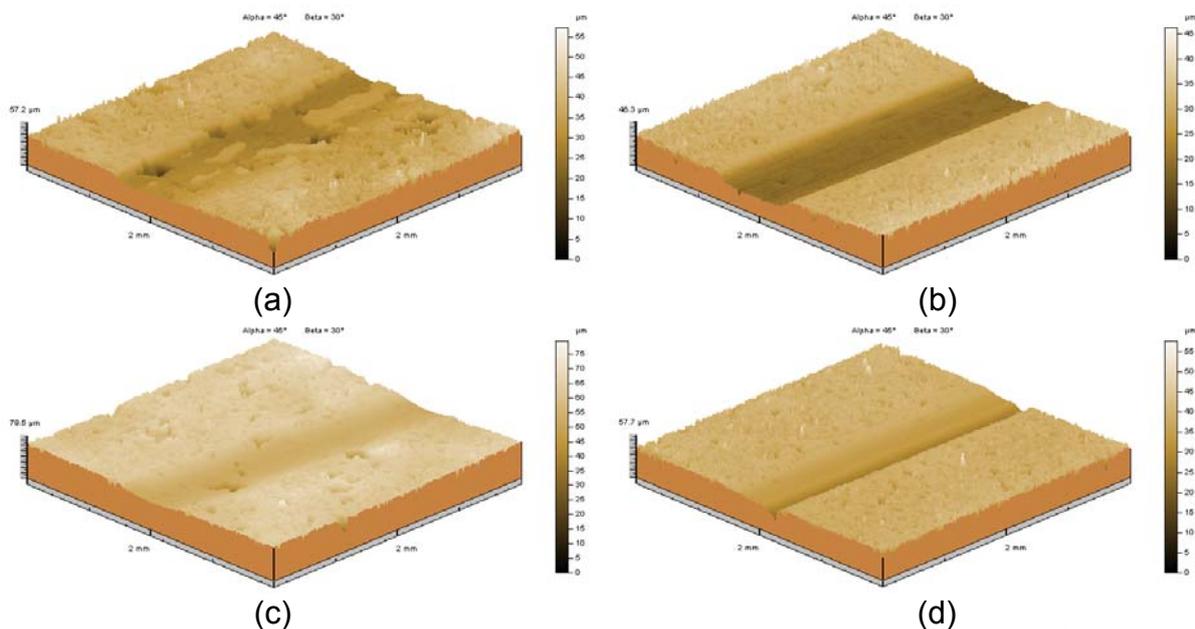


Figura 4. Imagens via interferometria a laser para as amostras: (a) P, (b) PM, (c) P Óleo, (d) PM Óleo.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a taxa de desgaste das ligas P e PM. Observa-se na figura que a adição do lubrificante sólido promoveu uma queda na taxa de desgaste (aproximadamente 30%). 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%.

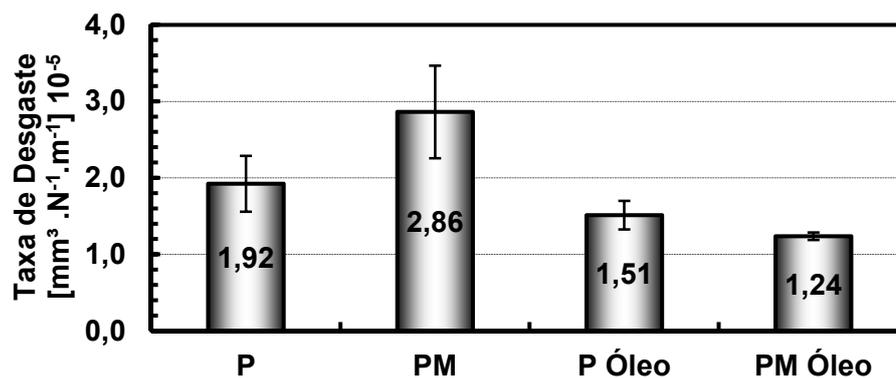


Figura 5. Taxa de desgaste para as ligas P e PM.

A Figura 6 retrata imagens obtidas por MEV por elétrons retroespalhados para as ligas P e PM ensaiadas a seco. percebe a formação de uma tribocamada na marca de desgaste da liga P simbolizadas pelas setas vermelhas e já para a liga 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 brancas. Quando ensaiadas em óleo, percebe-se 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 liga P. Para a liga PM, verifica-se que a marca de desgaste da mesma, é aparentemente mais lisa e com poros fechados, diferentemente do ocorrido com a liga P.

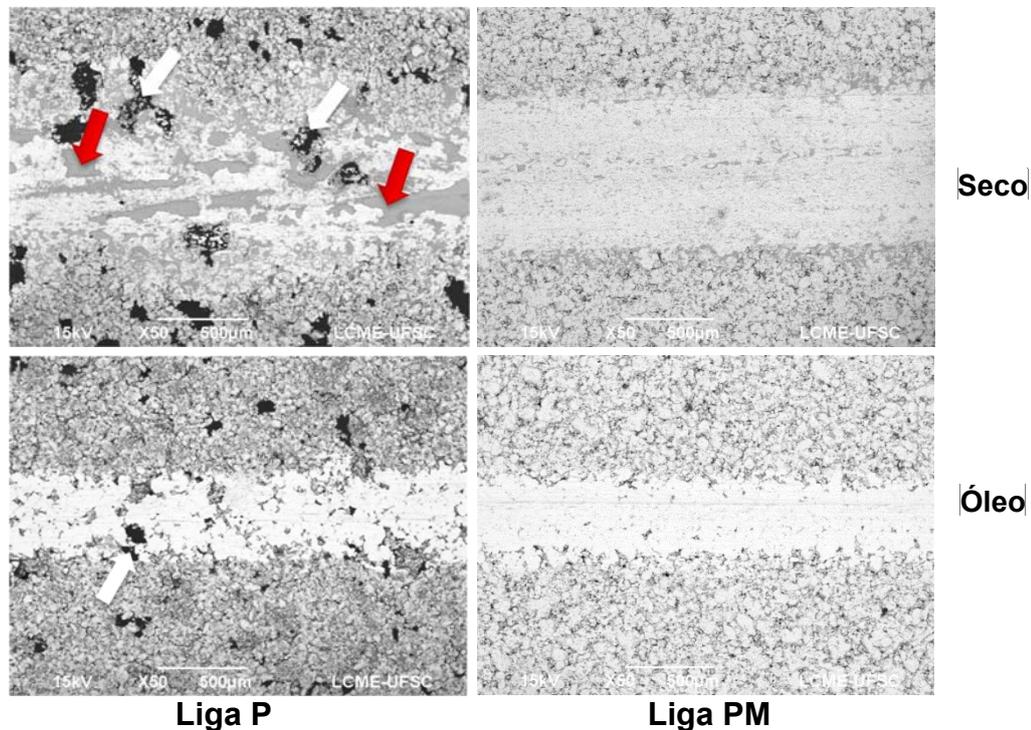


Figura 6. Mecanismos de desgaste. MEV por elétrons retroespalhados.

A Figura 7 revela com mais detalhes a superfície da marca de desgaste para as ligas P e PM ensaiadas a seco, onde percebe-se que há regiões lisas de coloração cinza claro (Figura 7-b), onde foram constatadas, via EDS (Figura 7-e), a presença de óxidos de ferro, carbono e cromo, este último possivelmente oriundo do contra corpo, como mostrado na Figura 10.

A Figura 8 descreve com mais detalhes a superfície da marca de desgaste para as ligas 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 liga 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 5. A Figura 9 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.

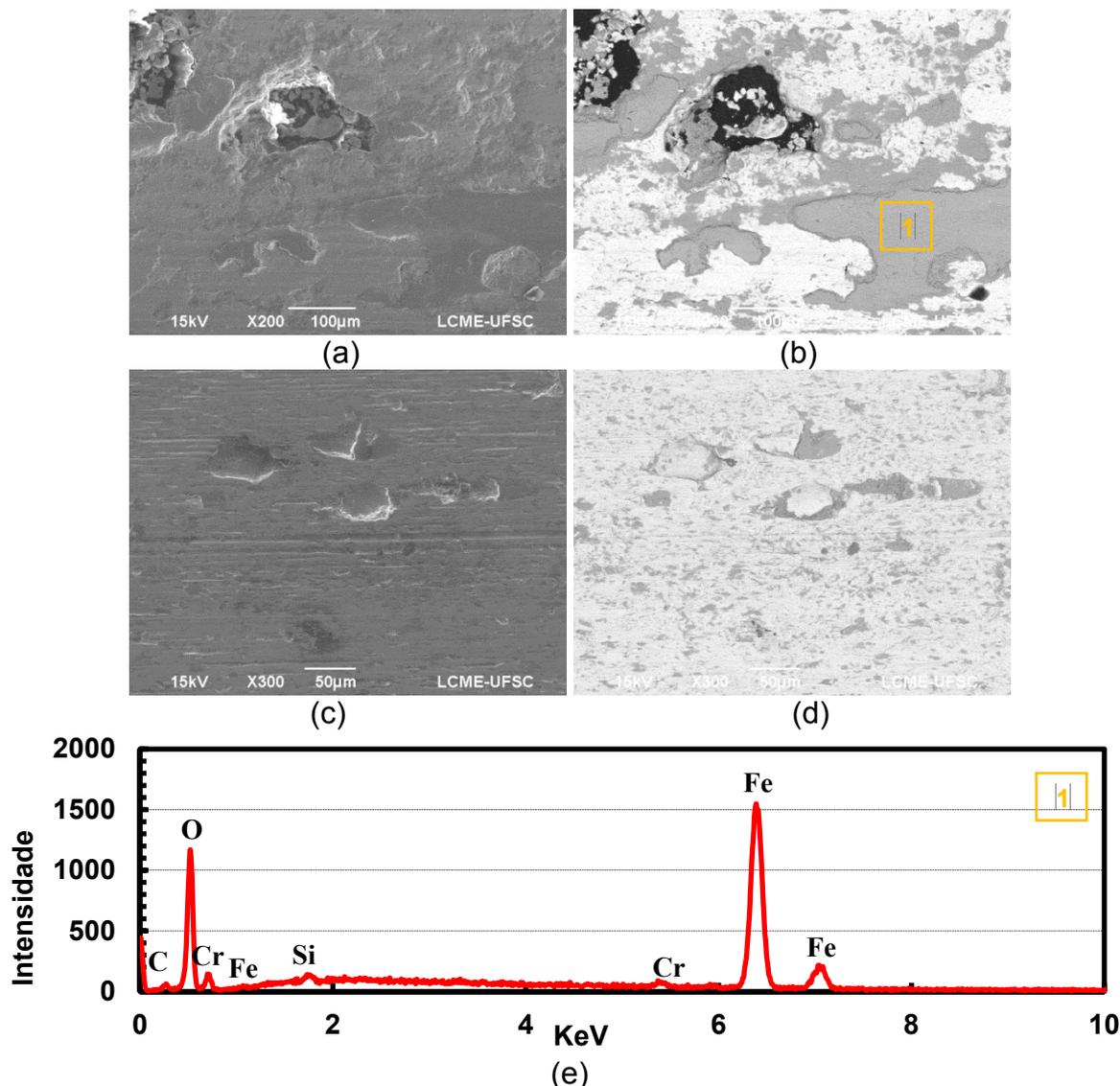
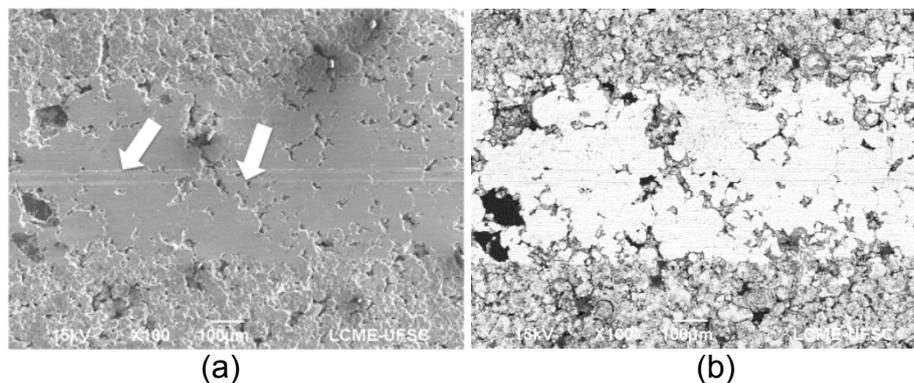


Figura 7. Mecanismos de desgaste. MEV. (a) e (b) Liga P; (c) e (d) Liga PM, (e) Análise via EDS da região 1. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.

A Figura 10 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 liga 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.



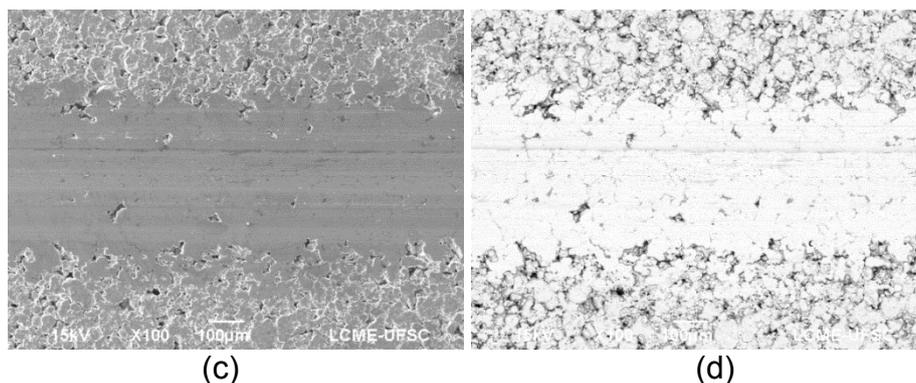


Figura 8. Mecanismos de desgaste. MEV. (a) e (b) Liga P; (c) e (d) Liga PM. À esquerda produzidas por elétrons secundários e à direita retroespalhados.

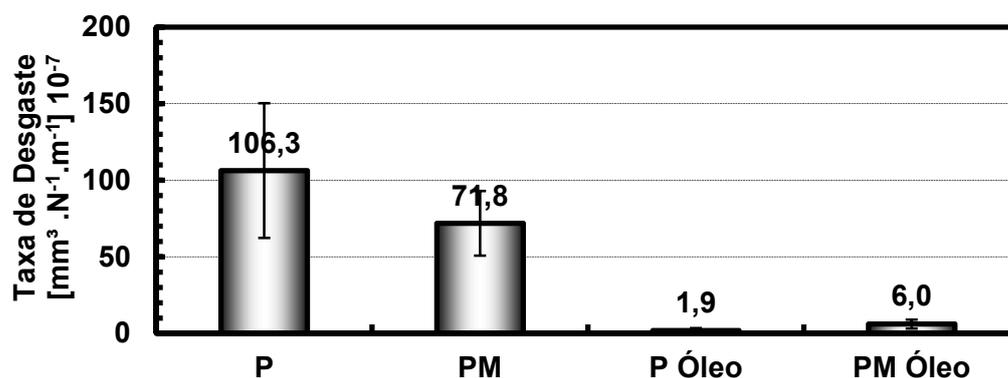
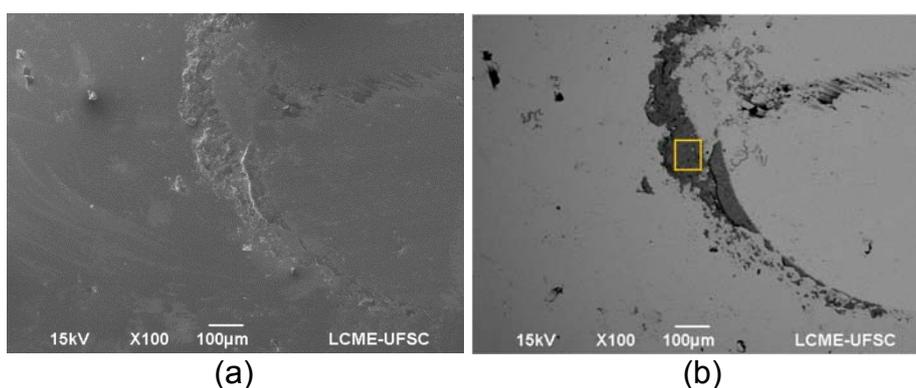


Figura 9. Taxa de desgaste do contra corpo para os ensaios efetuados.

Por fim, a Figura 11 apresenta imagens obtidas por MEV para os contra corpos ensaiados com óleo para as ligas 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 liga P, sinalizadas pelas setas brancas, como também apresentadas pela liga P, reforçando a sugestão da explicação para o maior desgaste apresentado quando lubrificada com os lubrificantes sólidos e líquidos, como verificado nas Figuras 5 e 8.



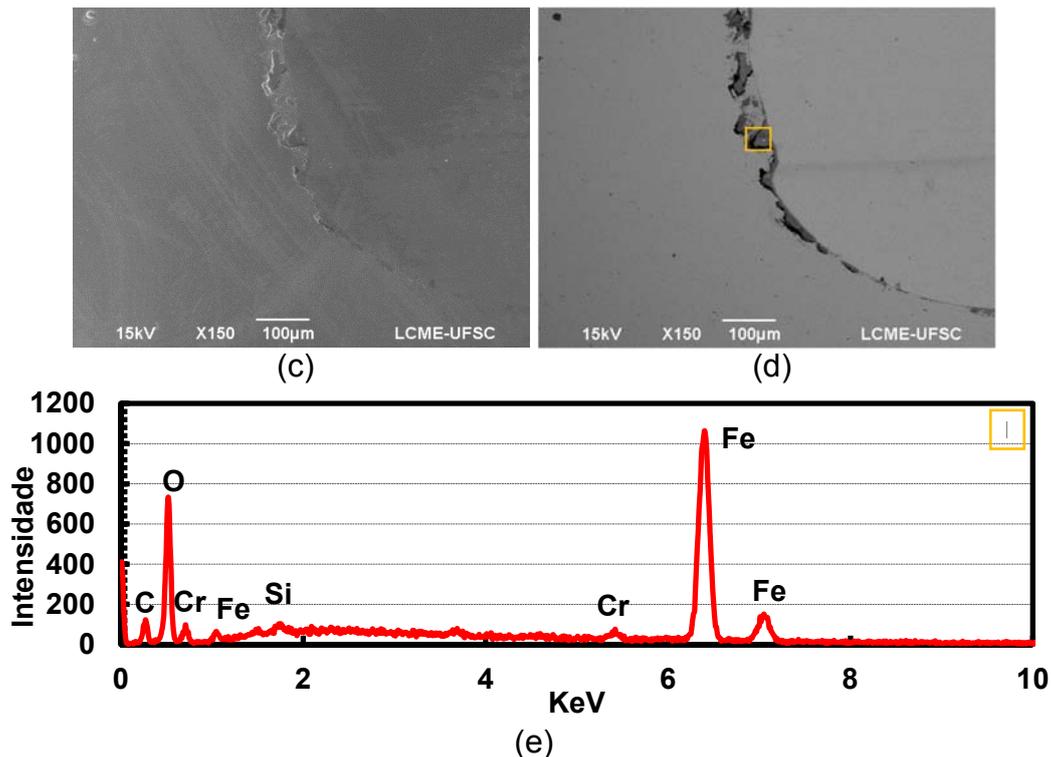


Figura 10. Mecanismos de desgaste para os contra corpos. MEV. (a) Imagem obtida por MEV por elétrons secundários para a liga P, (b) por elétrons retroespalhados para a liga P, (c) por elétrons secundários para a liga PM, (d) por elétrons retroespalhados para a liga PM (e) EDS típica.

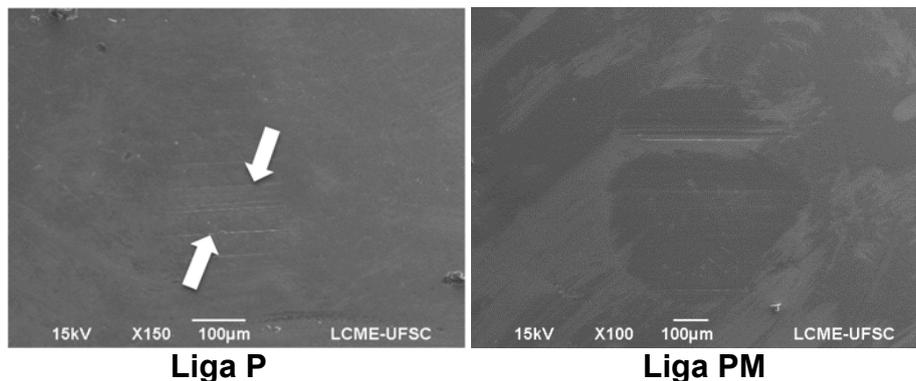


Figura 11. Mecanismos de desgaste dos contra corpos. MEV por elétrons secundários.

4 CONCLUSÃO

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 reduz o coeficiente de atrito (cerca de 4x) e a taxa de desgaste em 50%.

A lubrificação líquida utilizada isoladamente exerce uma grande influência no comportamento tribológico e governa o processo deixando um papel coadjuvante para os outros fatores. O atrito diminui cerca de 3x e a taxa de desgaste é reduzida em 230%.

Agradecimentos

Os autores agradecem as seguintes agências de financiamento de pesquisa: CNPq, BNDES, Capes e FAPEMIG, bem como Whirlpool / Embraco.

REFERÊNCIAS

- 1 Erdemir A. In: Bhushan B, editor. Modern Tribology Handbook: CRC Press; 2001. p. 787–825.
- 2 De Mello JDB, Binder R, Demas NG, Polycarpou AA. Effect of the actual environment present in hermetic compressors on the tribological behaviour of a Si-rich multifunctional DLC coating. *Wear*. 2009;267(5–8):907-15.
- 3 Binder C, Hammes G, Schroeder R, Klein AN, de Mello JDB, Binder R, et al. 'Fine tuned' steels point the way to a focused future. *Metal Powder Report*. 2010;65(4):29-37.
- 4 De Mello JDB, Binder C, Binder R, Klein AN. Effect of precursor content and sintering temperature on the scuffing resistance of sintered self lubricating steel. *Wear*. 2011;271(9–10):1862-7.
- 5 De Mello JDB, Binder C, Hammes G, Klein AN. Effect of the metallic matrix on the sliding wear of plasma assisted debinded and sintered MIM self-lubricating steel. *Wear*. 2013.
- 6 Hammes G, Schroeder R, Binder C, Klein AN, de Mello JDB. Effect of double pressing/double sintering on the sliding wear of self-lubricating sintered composites. *Tribology International*. 2014;70(0):119-27.
- 7 Zaitsev AL. Investigation of HDPE wear debris formed by friction against metal surfaces with different oxide film content. *Wear*. 1997;210(1–2):96-103.
- 8 Schroeder R, Hammes G, Binder C, Klein AN, Mello JDBd, editors. Effect of Double Pressing/Double Sintering on the Sliding Wear of Self-lubricating Sintered Composites. 3rd International Tribology Symposium of IFTOMM; 2013; Luleå, Sweden.
- 9 Oliveira Jr MM. *Lubrificação Sólida em Meio Fluido*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2013.
- 10 De Mello JDB, Oliveira Jr MM, Binder C, Klein AN. Solid Lubrication in Fluid Film Lubrication. ASIATRIB -2014; Agra, India, 2014.
- 11 Belin M. Triboscopy: A new quantitative tool for microtribology. *Wear*. 1993;168(1–2):7-12.
- 12 Bozzi AC, De Mello JDB. Triboscopia: Princípios potencialidades da técnica e aplicação em ensaios de desgaste por deslizamento. 61º Congresso Anual da ABM; Rio de Janeiro - RJ: Anais do 61º Congresso Anual da ABM; 2006. p. 4010-8.
- 13 Belin M, Lopez J, Martin JM. Triboscopy, a quantitative tool for the study of the wear of a coated material. *Surface and Coatings Technology*. 1994;70(1):27-31.