

LUBRIFICAÇÃO SÓLIDA EM MEIO FLUIDO

Mário Martins de Oliveira Júnior, mariomartjr@gmail.com
José Daniel Biasoli de Mello, Itm-demello@ufu.br

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. Os resultados sugerem 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 (cerca de 4 ordens de grandeza). 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.

Palavras chave: Ligas autolubrificantes, lubrificação fluida, sinergia, triboscopia.

1. INTRODUÇÃO

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 (Binder *et al.*, 2010; De Mello *et al.*, 2011; De Mello *et al.*, 2013; Hammes *et al.*, 2013).

A metalurgia do pó é uma técnica atrativa e competitiva para a produção de tais compostos, 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. Elevados desempenhos mecânicos e tribológicos, são resultados 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 (Hammes *et al.*, 2013; Schroeder *et al.*, 2013).

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 (De Mello *et al.*, 2009).

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-1,0%Si-0,6%C, enquanto que foram adicionados como lubrificantes sólidos 2,5% de grafite e 5% de nitreto hexagonal de boro (hBN). A natureza da matriz foi modificada também pela adição de molibdênio. A rota de processamento está bem escrita em (Oliveira Jr, 2013).

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

Os ensaios de deslizamento foram efetuados em um Tribômetro Universal Plint®, modelo TE 67 Plint and Partners LDT no modo alternado com amplitude de 5 mm e frequência de 2 Hz. 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 Fig. (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 de aquisição de sinais. 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 um algoritmo no programa MATLAB® para a confecção das imagens triboscópicas.

Na Fig. (1-b) percebe-se que um dos eixos mostra a posição sobre a amostra, ou seja, sobre a trilha de desgaste em cada ciclo do movimento alternado. 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, formando assim a

imagem triboscópica. 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.

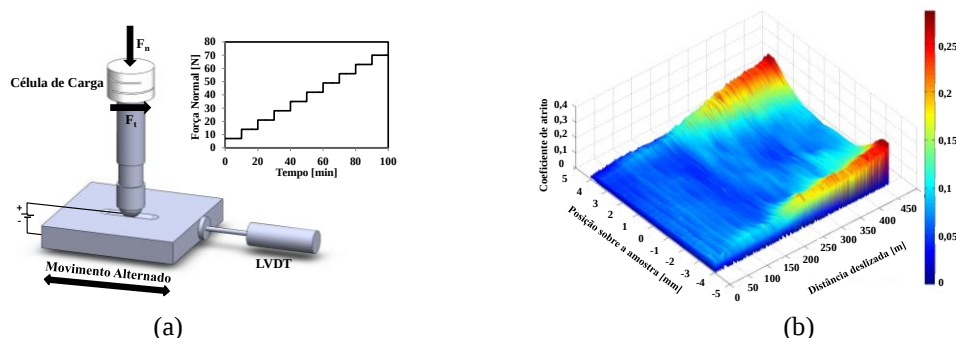


Figura (1) Testes tribológicos. (a) Modelo esquemático do teste. (b) Exemplo de uma imagem triboscópica 3D.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análises via MEV não revelaram diferenças significativas nas superfícies das amostras. As amostras autolubrificantes apresentaram dois diferentes tipos de reservatórios de lubrificantes sólidos regularmente distribuídos no volume da matriz metálica, enquanto que esta variou de ferrito-perlítica para martensítica (para as ligas contendo Mo). Análises via EDS e difração por raios-x mostraram a presença de nitreto hexagonal de boro e grafite nos reservatórios de lubrificantes sólidos. A Fig. (2) mostra o coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra para as amostras C e P.

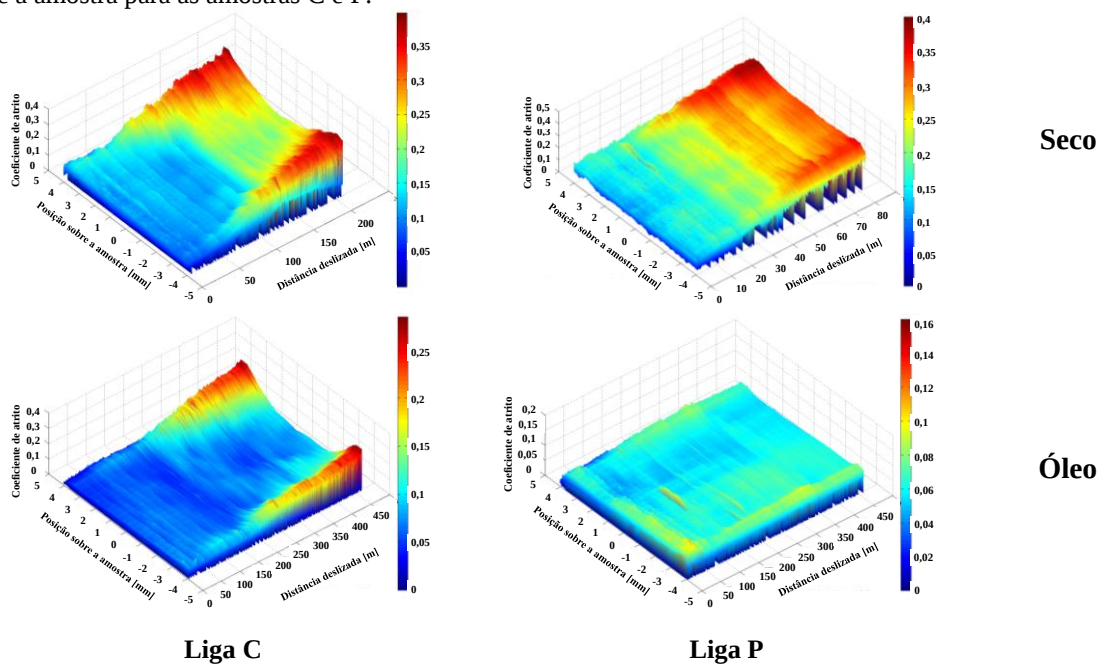


Figura (2) Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e da posição sobre a amostra.

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

A Fig. (3) mostra o comparativo da durabilidade para o modo seco e lubrificado. 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.

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 ($H_v = 171 \pm 57$), que, provavelmente, acarretou um maior desgaste, quando comparada com a amostra P ($H_v = 298 \pm 38$). O maior desgaste libera mais lubrificantes sólidos, deixando o contato mais rico em

lubrificante sólido que por sua vez, produz uma tribocamada mais bem formada, Fig. (4). Isso resulta em um coeficiente de atrito menor durante um período maior de tempo, aumentando assim a durabilidade do sistema tribológico.

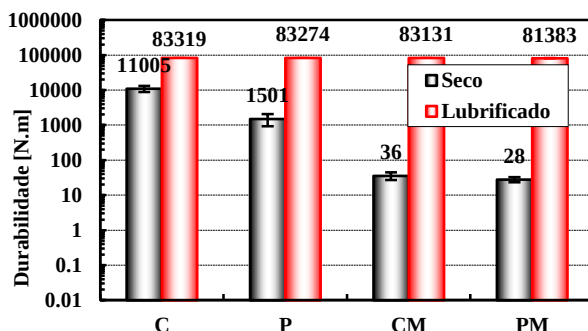


Figura (3) Comparativo da durabilidade para todos os ensaios efetuados.

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).

Pode-se observar, ainda, que, com a adição do óleo no contato, a durabilidade aumenta e nivela todos os materiais, apresentando durabilidade cerca de 1 ordem de grandeza maior que a durabilidade apresentada pela amostra C no modo seco, cerca de 2 ordens de grandeza maior que a durabilidade da amostra P, e 3 ordens de grandeza maior que a durabilidade apresentada pelas amostras CM e PM.

Pode-se observar na Fig. (4) que, de fato, o desgaste foi maior para a amostra C (largura da marca de desgaste). 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.

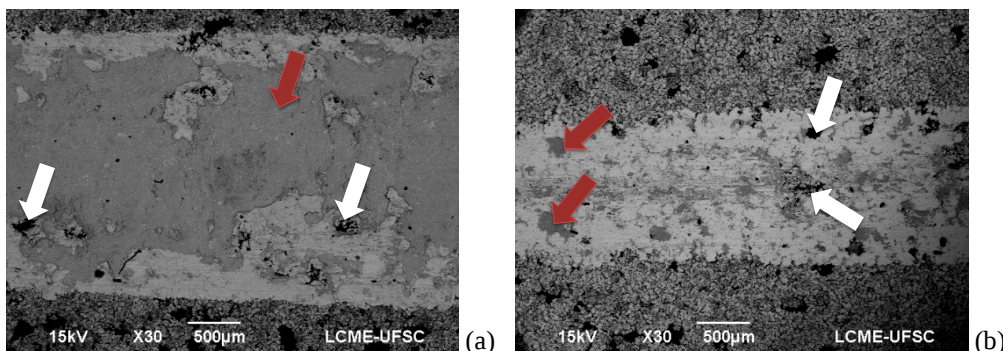


Figura (4) Imagens obtidas em MEV por elétrons retroespalhados para as amostras: a) C e b) P, ambas ensaiadas a seco.

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; (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 lubrificadas por um lubrificante líquido, enquanto que o segundo pode atuar tanto em contatos lubrificadas por lubrificantes líquidos quanto em contatos a seco.

Sherrington e Hayhurst (Sherrington e Hayhurst, 2001)(Sherrington e 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. Na Fig. (5) o material mais macio apresenta uma densidade de debris muito maior que o material mais duro para um mesmo coeficiente de atrito.

Os resultados do presente trabalho 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 na Fig. (2). A durabilidade das ligas ferrito-perlíticas é maior (ligas com lubrificante sólido) ou igual (ligas matrizes) do que a durabilidade das ligas martensíticas, provavelmente devido à geração de tribocamadas, como mostrado anteriormente. Em consequência disso, o maior tempo de ensaio da amostra C, acarreta um maior desgaste, gerando um maior acúmulo de debris. A Fig. (6) evidencia a maior quantidade de debris gerados nas amostras ferrito-perlíticas.

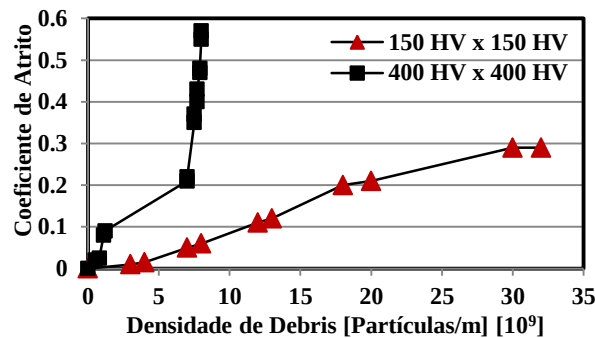


Figura (5) Evolução do coeficiente de atrito em função do aumento da densidade de debris (adaptado de Sherrington e Hayhurst, 2001).

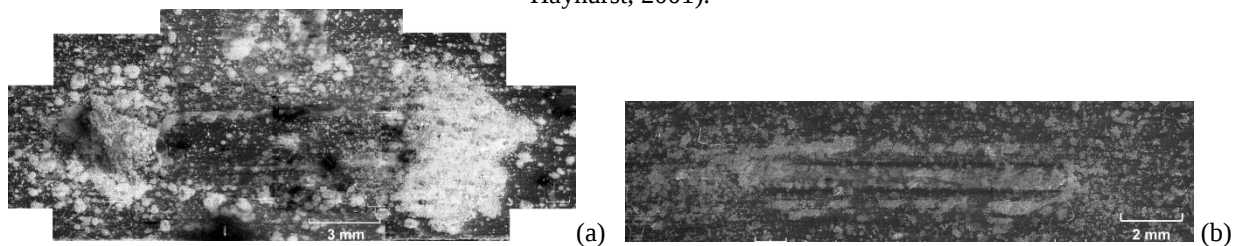


Figura (6) Aspecto típico da distribuição das partículas de desgaste. (a) Liga C. (b) Liga P.

4. CONCLUSÕES

Os resultados sugerem 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 (cerca de 4 ordens de grandeza).

A utilização isolada de lubrificantes sólidos aumenta em até 3 ordens de grandeza a durabilidade do regime de lubricidade do sistema devido à formação de uma tribocamada provavelmente proveniente dos reservatórios ativos de lubrificantes sólidos no interior das marcas de desgaste.

A lubrificação líquida utilizada isoladamente exerce uma grande influência no comportamento tribológico e governa o processo.

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.

4. AGRADECIMENTOS

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

5. REFERÊNCIAS

- 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.
- 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, 2013. ISSN 0043-1648.
- 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.
- 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.
- Oliveira Jr, M. M. Lubrificação Sólida em Meio Fluido. 2013. 80 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- 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.
- Sherrington, 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.