

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou o estudo do deslizamento lubrificado de dois corpos metálicos em um equipamento do tipo pino-sobre-disco/pino-sobre-placa, com o objetivo de caracterizar as respostas de desgaste e de atrito mediante variações introduzidas no sistema, a saber, variações físicas e químicas no fluido lubrificante (aditivação e contaminação) e variação da condição de trabalho (carregamento mecânico). Foram discutidos também aspectos relacionados a variações sistêmicas, tais como os efeitos causados pelo tipo do movimento relativo entre corpos.

Segundo os valores de carga e de velocidade utilizados, o estudo esteve focalizado no regime de lubrificação mista. Das análises efetuadas, foi possível concluir que:

1. Os desgastes observados foram pequenos, com valores médios menores que 50 μm para a perda de dimensão vertical total das amostras. O desgaste pequeno evidenciou que um filme de lubrificante esteve presente na interface em todos os ensaios realizados. Um cálculo aproximado do coeficiente de desgaste k , da ordem de $10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$, indicou que o regime de lubrificação foi misto, conforme comparação com valores da literatura. O desgaste, apesar de pequeno, foi dependente da condição de ensaio. Em termos de valores de área normalizada de desgaste do pino, os resultados estiveram na faixa de 24 a 530 $\mu\text{m}^2/\text{m}$.
2. Em termos do coeficiente de atrito, os valores médios estiveram na faixa de 0,05 a 0,14. Apesar da faixa ampla, houve algumas poucas correlações de maneira significativa com as variações estudadas. Apesar dessa constatação com os valores médios, a análise do comportamento do coeficiente de atrito ao longo do ensaio, juntamente com o do potencial de contato, evidenciaram fenômenos do contato relacionados a efeitos triboquímicos e situações de maior ou menor sollicitação do filme de lubrificante.
3. A formação de regiões de contato bem demarcadas e com superfícies riscadas, observada na grande maioria das amostras ensaiadas, indicou a ocorrência de contato sólido-sólido de proporção considerável nos ensaios. Logo, em termos de regime de lubrificação, é pouco provável que os filmes lubrificantes pudessem ter

sido mantidos totalmente íntegros, ou seja, contínuos entre as superfícies no contato. Assim, fenômenos puramente HD [dkt1] ou EHL são pouco prováveis de terem ocorrido.

4. Ainda em termos da lubrificação, observou-se que ocorreram diferentes proporções dos efeitos EHL e limítrofe, influenciados principalmente pelo nível de carregamento. Quanto ao efeito EHL, houve indicativos de que o mesmo pode ter ocorrido em escala microscópica (efeito micro-EHL). Quanto aos efeitos da lubrificação limítrofe, o estudo do potencial de contato indicou que um filme limítrofe (por efeito de adsorção) pode ter ocorrido na interface nos ensaios PP (oscilatórios com menores carregamentos). Nos ensaios DD (rotativos com menores carregamentos), esse filme foi mais dificultado, pelo favorecimento do mecanismo de abrasão a dois corpos nessa condição, e um efeito de filme isolante só foi evidente com a utilização do óleo aditivado. Com o maior carregamento, tanto o desgaste como o comportamento do atrito foram modificados com o uso do aditivo, o que indicou que a natureza química do aditivo e, portanto, a manifestação do modo limítrofe, preponderou nesse nível. Porém, não houve evidência de ruptura de filme, que pudesse ser relacionado a atritos ou aos coeficientes de desgaste elevados, não havendo também identificação de tal ruptura na análise ferrográfica das partículas de desgaste.
5. O efeito da presença da aditivação no óleo foi evidente nos ensaios e sua atuação dependeu do sistema mecânico, da condição de carregamento e da presença da contaminação. Com o menor nível de carregamento, a aditivação diminuiu a propensão à oxidação nos ensaios oscilatórios e diminuiu o desgaste nos ensaios rotativos. Ainda com o menor carregamento, foi visto que o aditivo atuou, mostrado pelos resultados do potencial de contato e pela análise microscópica das superfícies, mas não produziu efeito no desgaste e nem no atrito nos ensaios PP, porém diminuiu ambos nos ensaios DD. Com o maior nível de carregamento, a presença da aditivação no óleo diminuiu a deformação plástica (“arraste” de material) das superfícies, porém não necessariamente diminuindo a perda de material. O efeito do aditivo nesse caso esteve relacionado ao favorecimento da conformação geométrica das superfícies, em detrimento do desgaste do contra-corpo (material de menor dureza). Nesse nível de carregamento, houve distinção entre os sistemas, tal que, nos

ensaios oscilatórios, as superfícies ficaram escurecidas e lisas; nos ensaios rotativos, as superfícies ficaram uniformemente riscadas e claras. Foi possível perceber que a contaminação reduziu o efeito da aditivação nos ensaios onde o aditivo esteve presente.

6. Ainda quanto ao efeito da aditivação, as observações das características sub-superficiais confirmaram a atuação de diferentes mecanismos de desgaste em função da condição de aditivação. Na análise sub-superficial de placas e discos, notou-se diferenças morfológicas significativas principalmente entre a placa e o disco ensaiados com óleo aditivado.
7. Na análise sub-superficial de placas dos ensaios P (oscilatórios sob maior nível de carregamento), observou-se arraste de material na placa ensaiada com óleo não aditivado e formação de trincas emergindo à superfície, com refino do material da região sub-superficial, na placa ensaiada com óleo aditivado. Considerou-se que as alterações no material ocorreram durante a fase de assentamento do ensaio, onde a alta rugosidade presente, aliada à utilização da aditivação, provocou um mecanismo de desgaste sem deformação e resultando em alisamento, porém causando propensão ao trincamento. Já sem o aditivo antidesgaste, o contato metálico pode ter sido mais intenso na fase de assentamento, causando a morfologia com arraste de material.
8. Na sub-superfície de um dos discos dos ensaios D com óleo aditivado (rotativos com maior carregamento), foi possível notar a presença de morfologias similares a trincas emergindo à superfície. Entretanto, foi possível também notar, próximo a essas regiões, áreas com evidências de deslocamento de material e de microdeformação sub-superficial. Assim, embora a aparência tenha similaridade com trinca, essa morfologia foi relacionada a um arraste de material na superfície. As microtrincas que apareceram na superfície do disco ocorreram apenas nas abas (material deslocado pelo sulcamento) formadas pelo riscamento. Além disso, não houve evidências de refino da microestrutura sub-superficial, da forma vista na placa do ensaio oscilatório com óleo aditivado.
9. O efeito da presença da contaminação no óleo foi mais evidente nos ensaios com menor nível de carregamento, onde o desgaste foi significativamente maior com a presença da contaminação. Hipóteses foram formuladas para a entrada de abrasivos

na interface, e a mais provável foi relacionada à ancoragem das partículas nas reentrâncias produzidas pela rugosidade do acabamento inicial do contra-corpo.

10. O efeito do carregamento mecânico foi significativo, observado principalmente na análise microscópica das superfícies, que evidenciou um grau de severidade muito maior com o maior nível de carregamento. Ressalta-se ainda que isso ocorreu mesmo com os ensaios sob condições de operação para um mesmo regime de lubrificação mista, este identificado baseado na literatura.
11. Comparando os resultados obtidos em termos sistêmicos, foi verificado que os desgastes nos pinos foram maiores nos ensaios com o sistema oscilatório. O sistema mecânico influencia, entre outras, as características de fluxo de lubrificante nas proximidades do contato entre as superfícies das amostras metálicas ensaiadas. Um aspecto discutido foi quanto à capacidade do fluxo ser renovado no contato e a conseqüente menor permanência de resíduos na interface. Influências no desgaste causadas pelo resíduo de desgaste devem ter sido maiores nos ensaios oscilatórios. Além disso, fatores topográficos, como a maior rugosidade **Ra** das placas, e a freqüência (número de passagens do pino) no contra-corpo também podem ter contribuído para o maior desgaste observado com o sistema oscilatório.
12. Já quanto ao coeficiente de atrito, os valores foram maiores nos ensaios com o sistema rotativo. As diferenças foram significativas entre ensaios oscilatórios e rotativos se concentraram nas condições com óleo não aditivado (SA) e com óleo aditivado e contaminado (c CA). Essas condições referem-se àquelas em que nem o aditivo nem o contaminante foram utilizados e àquelas onde ambos estavam presentes, mas o aditivo teve a sua influência minimizada pela presença do contaminante.
13. Com as análises de tendências do desgaste considerando fatores com parâmetros relacionados à lei do desgaste de Archard (carga normal) e fatores relacionados à espessura de filme (carga normal/velocidade média), foi observado que aparentemente, uma proporcionalidade do desgaste com a lei de Archard não foi clara, visto que a proporção dos valores do coeficiente de desgaste modificado, baseado na lei de Archard (**k'**), não seguiu a dos resultados de desgaste.

Por outro lado, uma proporção do desgaste foi observada com um coeficiente que considera, além da carga, a velocidade média, ou seja, em função de V_{med}/W .

Análises com o uso de expoentes em V e em W , conforme a equação da espessura do filme EHL para contatos esfera-plano ($V_{med}^{0,68}$ e $W^{0,07}$), também foram consideradas. A introdução da rugosidade σ foi determinante na análise do desgaste em função do fator $V_{med}^{0,68}/W^{0,07}$ para evidenciar diferenças de tendências das condições de ensaio e das tendências dos resultados de desgaste e de atrito entre os dois sistemas considerados no estudo.

14. Por fim, a observação das diferentes tendências das respostas de desgaste e atrito, afetadas pelas diferentes condições de ensaio, que foram verificadas com o fator $(V_{med}^{0,68}/W^{0,07})/\sigma$, evidenciaram a importância de dois fatores no estudo tribológico de sistemas lubrificados, a saber, do efeito EHL (estritamente, micro-EHL), que ocorre na geometria do contato do par, e do acabamento superficial.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como meio de complementar, dando continuidade ao presente estudo, são sugeridos dois aspectos de investigação:

- 1- Estudar as mesmas variações de ensaio com amostras com superfícies polidas, com a finalidade de:
 - Analisar o desgaste do contra-corpo de maneira mais precisa.
 - Explicar as tendências do desgaste global (pino e contra-corpo), confrontando com as tendências do coeficiente de atrito.
 - Caracterizar as diferenças sistêmicas com mais detalhe.
- 2- Realizar estudos com a técnica interferométrica, para explicitar diferenças no comportamento físico da espessura do filme de óleo, frente às condições de aditivção, contaminação e de carregamento mecânico.