IRAMAR DA SILVA TERTULIANO

Textura superficial: Efeito sobre o desempenho de óleos aditivados e não aditivados em ensaios alternados

São Paulo (2017)

IRAMAR DA SILVA TERTULIANO

Textura superficial: Efeito sobre o desempenho de óleos aditivados e não aditivados em ensaios alternados

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Amilton Sinatora

São Paulo (2017)

IRAMAR DA SILVA TERTULIANO

Textura superficial: Efeito sobre o desempenho de óleos aditivados e não aditivados em ensaios alternados

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Amilton Sinatora

São Paulo (2017)

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.		
São Paulo, de	de	
Assinatura do autor:		
Assinatura do orientador:		

Gatalogação-na-publicação

Tertuliano, Iramar da Silva Textura superficial: Efeito sobre o desempenho de óleos aditivados e não aditivados em ensaios alternados / I. S. Tertuliano -- versão corr. -- São Paulo, 2017. 96 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

 Textura superficial 2.Lubrificação limitrofe 3.Ensaios Alternados 4.Óleo totalmente formulado I.Universidade de São Paulo. Escola Politêcnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por toda provisão e cuidado comigo e minha família ao longo do desenvolvimento do trabalho.

A minha linda esposa Ana Júlia, que torna minha vida e meu trabalho ainda mais feliz.

A minha grande família, que mesmo de longe dão todo o suporte.

Ao professor Amilton Sinatora, por toda orientação, inspiração, paciência e principalmente pela oportunidade.

Ao professor Quaresma, sem o qual nada deste trabalho seria possível.

Aos amigos Tiago Cousseau e Francisco Profito, que além da amizade, também foram meus orientadores.

Um agradecimento especial ao Luiz Alberto Franco na imensurável ajuda na elaboração do texto e pelas incansáveis tentativas no ensino de estatística, que inspira todos ao seu redor pelo grande entusiasmo em suas pesquisas.

Aos professores Roberto Martins e Izabel Machado por todo suporte e profissionalismo.

Aos amigos Sebastian, Pedro, Paulo Machado, Raphael Oliveira, Gustavo Tressia, Jimmy Penagos, Vanessa Seriacopi e Larissa Ihara, que tornam os dias mais divertidos no LFS. Sem esquecer do Alexander, por todas as Caronas ao longo destes 3 anos.

Ao LFS, que além de trabalhos científicos, gera grandes amizades: Roberto Oliveira, Pablo, Juan Ignácio, Marcos Ara, Luiz Lima, Guido, Michel, Gustavo Siebert, Rafael Obara, Murilo, Newton, Arnaldo, Cassiano, Karol, Felipe Carneiro, Renata e Luiz Varela.

A equipe de técnicos: Carlos, Rodnei, Cássio e Rafael que cuidam com excelência de toda a estrutura do laboratório. Não esquecendo dos meus amigos mais antigos, Francisco e Fábio, que foram essenciais em tudo, muito obrigado.

RESUMO

Neste trabalho foram conduzidos experimentos de laboratório no intuito de avaliar o efeito da textura superficial no desempenho de óleos lubrificantes aditivados e não aditivados. Os materiais envolvidos nos ensaios são referentes a materiais de anel e camisa de motores de combustão interna e as condições de superfície envolveram processamentos de lixamento e retífica, bem como texturização de microcavidades a laser. Os ensaios foram do tipo alternado, com regime limítrofe de lubrificação. Inicialmente foram feitas análises sobre a metodologia utilizada para o cálculo do coeficiente de atrito em ensaios alternados, mostrando que os valores fornecidos diretamente pelo equipamento (aqui chamados de coeficiente de atrito pico a pico) não foram efetivos para este estudo, pois apresentam alta dispersão entre as réplicas dos ensaios e não é representativo em termos de eficiência do tribossistema. Foram geradas microcavidades nas superfícies de alguns blocos de ferro-fundido mediante texturização a laser. Esta texturização gerou rebarbas que foram retiradas por um processo de lixamento. Com isso, uma parte dos resultados avaliou o efeito do lixamento nos parâmetros de rugosidade, no entanto que o processo acaba por aumentar os valores de raio de aspereza e reduzir a altura média dos picos. Por fim, ensaios com óleo sem aditivo tiveram formação de óxido em todas as condições de superfície, com pouca variação do coeficiente de atrito. Já nos ensaios com óleo aditivado, os resultados mostraram pouca influência das microcavidades e maior contribuição das características de picos (raio e altura) na formação de tribofilmes redutores de atrito (neste caso MoS₂).

Palavras-Chave: Textura superficial. Coeficiente de Atrito. Lubrificação.

ABSTRACT

This work was conducted by experimental tests in order to evaluate the effect of surface texture on fully formulated oil and base-oil performance. In these tests, the materials were related to the piston ring and cylinder, in which surfaces were sanded, grounded and textured by laser. In addition, the tests were carried out by reciprocating movement and boundary conditions. A coefficient of friction study in reciprocating tests was performed, showing that peak-to-peak methodology does not represent properly the tribosystem efficiency. Burr was generated around the dimples (made by laser surface texturing), in which were removed by sanded process. The results showed that sanded process increased the peak radius and decreased the peak height. The results considering the base oil showed oxide formation on the surface in all the cases, occurring low variation of friction coefficient in the system. On the other hand, in the fully formulated oil results, the dimples had no influence on MoS2 formation; however, it was possible to see a strong relation with the radius and average height of the asperities.

Keywords: Surface texture. Coefficient of friction. Lubrication.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sumário dos métodos comumente utilizados em engenharia de superfícies. Adaptado de (HUTCHINGS, 1992)7
Figura 2 – Pesquisas em texturização de superfícies ao longo de 50 anos. (a) Número de publicações por ano; (b) Método de pesquisa. (GROPPER; WANG; HARVEY, 2016) .9
Figura 3 – Linha do tempo do desenvolvimento de aditivos para lubrificantes. (SPIKES, 2015)10
 Figura 4 – Mecanismos microscópicos que geram atrito. (a) Pontos de interação de asperezas, (b) Plowing e (c) Partículas de desgaste. Adaptado de (ASME HANDBOOK, 1992)
Figura 5 - Comportamento assimétrico da força de atrito em ensaios alternativos: a) idealizado e b) observado frequentemente, (BLAU, 2009)14
Figura 6 – Mecanismos físicos em ablação a laser com SP e USP. (DE OLIVEIRA TEIXEIRA; REIS; JANSSEN, 2015)
Figura 7 – A direita, cavitação observada em uma simples microcavidade esférica mostrando bolhas de ar na saída. A esquerda um simples diagrama esquemático mostrando perfíl de pressão hidrodinâmica gerada no fluido sem a cavitação. Adaptado de (ZHANG, 2014)
Figura 8 – Estrutura típica de um Dialquilditiocarbamato de molibdênio. (SPIKES, 2015)
Figura 9 – Redução de atrito por MoDTC. MoDTC1 e MoDTC2 diferem nos fornecedores e nos níveis de impurezas (GRAHAM; SPIKES; KORCEK, 2001)20
 Figura 10 – (a) Espectro Raman encontrado em uma trilha de ensaio de deslizamento. (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2015) (b) esquema dos modos de vibração <i>E2g1</i> e <i>A1g</i>.(SAHOO et al., 2013)
Figura 11 – Caminho de reação proposto para decomposição de MoDTC em contatos tribológicos. (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2016)22
Figura 12 - Contato conforme e não – conforme (BJÖRLING, 2014)23
Figura 13 – Mecanismo de desenvolvimento de pressão para lubrificação hidrodinâmica.
Figura 14 – Contato lubrificado de Hertz (SEABRA; STTOMAYOR, 2002)25
Figura 15 – Curva de Stribeck, efeito do numero de Hersey no coeficiente de atrito (BJÖRLING, 2014)
 Figura 16 –Curva esquemática de Stribeck: Coeficiente de atrito vs número de Hersey. Para cada regime de lubrificação é mostrado o correspondente aditivo atuante. Estrema pressão ("Extreme Pressure" - EP); antidesgaste ("Anti-Wear" - AW); modificador de atrito ("Frction Modifier" - FM) e melhorador de índice de viscosidade ("Viscosity Index Improve" - VII).
Figura 17 – Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de deslizamento29
Figura 18 – Microestrutura dos CP's de ferro fundido cinzento com ataque nital 5% 30

Figura 19 – Topografia típica das fitas utilizados neste trabalho30
Figura 20 – Célula contendo uma microcavidade no centro
Figura 21 – Célula contendo uma microcavidade, com dimensões baseadas nos resultados de Klingerman, 2005, (a) textura parcial e (b) textura completa32
 Figura 22 – Espaçamentos e distribuições das microcavidades (a) Bp = 0,357mm, textura TP-1; (b) Bp = 0,169, textura TP-2 e (c) textura completa com fração de área de 10%, textura TC.
Figura 23 – Topografia da amostra com textura TP-1 por interferometria 3D33
Figura 24 – (a) Máquina de movimento alternado, (a) Vista geral; (b) detalhe da câmara de teste
Figura 25 - Esquema da câmara de teste do tribômetro SRV-4: (1) bloco de suporte com sistema piezoelétrico de medição e células de carga; (2) haste de movimento alternado; (3) haste do carregamento de força; (4) resistência térmica; (5) termômetro da resistência; (6) Suporte do anel de teste
Figura 26 – Esquema das posições de medição de rugosidade antes e após o lixamento.
Figura 27 – (a) Esquema das medições 2D com 9 perfis, sendo 3 em cada posição; (b) esquema com as medições 3D
Figura 28 – Ilustração da tela de saida MAHLE-SUMMITS utilizados neste trabalho para o cálculo dos parâmetros de contato de Greenwood: (a) resultados de uma topografia e (b) resultados para um perfil. (PROFITO, 2010)37
Figura 29 – Aspecto macroscópico do: anel reto, bloco de ferro fundido, suporte de fixação do anel e recipiente de óleo onde o bloco é fixado
Figura 30 – (1) Suporte do anel de teste (vista lateral) (2) recipiente do bloco; (3) óleo lubrificante; (4) segmento de anel; (5) bloco de ferro fundido
Figura 31 – Topografia das texturas (a) antes e (b) após o lixamento
Figura 32 – Variação da posição e velocidade ao longo de um ciclo de deslizamento do anel sobre o bloco em uma frequência de 10Hz40
Figura 33 – Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies sem textura e óleo lubrificante PAO 8. Duas réplicas do ensaio (E1 e E2)42
Figura 34 – Exemplo de valores de COF em função do tempo para um ciclo de deslizamento do anel sobre o bloco (Curva FSA). Dados do ensaio 2 efetuados nas superfícies retificadas e lubrificante PAO 8
Figura 35 - Exemplo de valores de COF em função do tempo para um ciclo de deslizamento do anel sobre o bloco. Dados do ensaio 2 efetuados nas superfícies retificadas e lubrificante PAO 8
Figura 36 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies retificadas e óleo lubrificante PAO 8. Valores de COF dados diretamente da SRV (COFPP) e valores médios. Ensaio 1 – E1 e Ensaio 2 – E244

Figura 37 - Exemplo de valores de COF em função do tempo para um ciclo de deslizamento do anel sobre o bloco. Dados do ensaio 2 efetuados nas superfícies sem textura e Figura 38 – Esquema mostrando cinco ½ ciclos, exemplificando o intervalo de tempo no qual o valor médio de COFMC é calculado45 Figura 39 - Valores de COF_{PP} e COF_{MC} em função do tempo no deslizamento do anel sobre o bloco. Ensaios efetuados nas superfícies sem textura e lubrificante PAO 8. Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – "Friction Signal Analysis") para os tempos de 360 Figura 40 – Exemplo de força de atrito em função da posição para ½ ciclo de deslizamento. Figura 41 - Trabalho total realizado pela força de atrito ao longo de ½ ciclo de deslizamento.47 Figura 42 – Comparação dos valores de COF em função do tempo para um ciclo de deslizamento do anel sobre o bloco. Ensaios efetuados nas superfícies retificadas e lubrificante PAO 8. (a) COFPP e COFMC (igual Figura 39); (b)) COFPP e COFM calculado em função do trabalho......48 Figura 43 – (a) Perflometria 3D de uma amostra texturizada a laser (b) Dimensões das Figura 44 – Perfilometria 3D a amostras retificadas com níveis diferentes de rugosidade. A amostra com maior rugosidade foi chamada de 1 e a com menor rugosidade foi chamada de 2. As setas indicam as mudanças na morfologia dos picos de asperezas Figura 45 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies (a) retificadas (RT) e (b) retificadas+lixadas (LX). Oleo lubrificante PAO 8. A numeração ao lado de RT e LX é referente a réplica do ensaio......55 Figura 46 – Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com PAO 8. Amostras somente retificadas. Figura 47 – Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com PAO 8. Amostras retificadas + lixadas. Figura 48 – Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies (a) retificadas (RT) e (b) retificadas+lixadas (LX). Oleo lubrificante PAO 8. A numeração ao lado de RT e LX é referente a réplica do ensaio. Cálculo pelo método da energia. Figura 49 – Parâmetros de altura Rq para as amostras de ferro fundido antes dos ensaios. Valores referentes as réplicas 1,2 e 3 dos ensaios com PAO 8 em superfícies retificadas e retificadas+lixadas. As três colunas representam as réplicas does Figura 50 – Trilhas de ensaio de amostras de ferro-fundido ensaiadas com PAO 8. Ensaio 1. (a) superfície retificada; (b) superfície retificada e lixada. As setas indicam a região deformada plasticamente e possível formação de óxidos......57

Figura 51 – Mapa de elementos da trilha de desgaste na superfície de ferro-fundido retificada, ensaiada com óleo PAO 8. Ensaio 158
Figura 52 – Espectro característico raman observado nas superfícies oxidadas. Ensaio com óleo PAO 8 e superfície retificada58
 Figura 53 –(a) Espectro raman característico de Fe₃0₄. (b) Espectro raman característico de Fe₂0₃.(c) Espectro característico da formação de Fe₂O₄ juntamente com Fe₂O₃. (STEHLE et al., 2011)
Figura 54 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies lixadas (RT) e óleo lubrificante (a)PAO 8 e (b) 5W30. A numeração ao lado de Lix é referente a réplica do ensaio
Figura 55 - Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com 5W3060
 Figura 56 – Dados de FSA - COF em função da posição para ensaios com 5W30. (a) Ensaio 1 e (b) ensaio 3. Valores referentes a 2 ciclos e meio obtidos a cada 120 segundos de ensaio. Linhas azuis são valores de COF nos tempos de 120 a 1080s e as linhas verdes de 1200 a 1800s.
Figura 57 - Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com 5W3061
Figura 58 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies (a) retificadas (RT) e (b) retificadas+lixadas (LX). Oleo lubrificante 5W30. A numeração ao lado de RT e LX é referente a réplica do ensaio. Cálculo pelo método da energia.
Figura 59 - Parâmetros de altura Rq para as amostras de ferro fundido retificadas e retificadas + lixadas. Valores referentes as réplicas 1,2 e 3 dos ensaios com 5W30. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita
Figura 60 – Mapa de elementos da trilha de desgaste na superfície de ferro-fundido ensaiada com óleo 5W30. Ensaio 1. A seta indica uma região com deformação plástica
 Figura 61 – (a) Espectro raman da trilha de desgaste na superfície de ferro-fundido retificada, ensaiada com óleo 5W30. Ensaio 1. (b) Espectro raman de MoS₂ (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2015)
Figura 62 – Espectro raman com pico em 337cm-1. Ensaio com superfície somente retificada e óleo 5W30
Figura 63 – (a) Faixa de desgaste da amostra retificada, ensaiada com óleo 5W30 ensaio 1; (b) faixa de desgaste da amostra lixada, ensaiada na condição 5W30 ensaio 165
Figura 64 – Mapa de elementos da trilha de desgaste na superfície lixada de ferro-fundido, ensaiada com óleo 5W30. Ensaio 165
Figura 65 –Espectros raman da trilha de desgaste na superfície de ferro-fundido lixada, ensaiada com óleo 5W30. Ensaio 1 (a) MoS2 e (b) MoS2+MoSx66
Figura 66 – Coeficiente do atrito em função do tempo com diferentes (a) temperaturas e (b) Pressões de contato. Espectros raman para diferentes (c) temperaturas e (d)

Pressões de contato. Ensaios esfera-sobre-disco (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA,

- Figura 68 Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies (a) de textura TC e (b) retificadas + lixadas. Ensaios com lubrificante PAO 8.69
- Figura 69 Análise detalhada do sinal de atrito (FSA Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com PAO 8. Superfície com textura TC.69
- Figura 70 Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (textura TC) e óleo lubrificante PAO 8. Superfícies com (a) textura TC e (b) lixadas. A numeração ao lado de TC é referente a réplica do ensaio. Os dados do ensaio 1 foram corrompidos, por isso não são mostrados.......70
- Figura 71 (a) Valor do raio médio das asperezas e (b) Parâmetro funcional Rpk para amostras somente retificadas, amostras retificadas + lixadas e amostras retificadas + lixadas + texturizadas, ensaiadas com PAO 8. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita......70

- Figura 74 Coeficiente de atrito em função médio do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (a) TP 1 e (b) TP 2. Óleo lubrificante PAO 8. A numeração ao lado de TP 1 e TP 2 é referente a réplica do ensaio......72

- Figura 78 Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (a) TC e (b) retificadas+lixadas. Óleo lubrificante PAO 8. A numeração ao lado de TC e LX é referente a réplica do ensaio......74
- Figura 79 Análise detalhada do sinal de atrito (FSA Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com 5W30. Textura TC74
- Figura 80 Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (textura TC) e óleo lubrificante 5W30. Superfícies com (a) textura TC e (b) lixadas. A numeração ao lado de TC é referente a réplica do ensaio......75

- Figura 83 Faixa de desgaste da amostra ensaiada com óleo 5W30 TC ensaio 3.76
- Figura 85 Espectros raman da trilha de desgaste na superfície de ferro-fundido com textura TC, ensaiada com óleo 5W30. Ensaio 1 (a) MoS₂ e (b) MoS₂+MoS_x......77
- Figura 87 Análise detalhada do sinal de atrito (FSA Friction Signal Analysis) em um tempo de 480s (a) 480s e (b) 1680s para textura TP 1; e 480s (c) 480s e (d) 1680s para textura TP 2. Ensaios com 5W30.
- Figura 88 Coeficiente de atrito em função médio do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (a) TP 1 e (b) TP 2. Óleo lubrificante 5W30. A numeração ao lado de TP 1 e TP 2 é referente a réplica do ensaio......79

- Figura 91 Relação dos valores de COF_M com a razão dos parâmetros de rugosidade $\beta s/R_{pk}$81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química (% em peso) dos CPs de ferro fundido (Franco, 2015) 29
Tabela 2 - Propriedades físicas dos lubrificantes utilizados
Tabela 3 – Condições operacionais utilizadas nos ensaios de movimento alternado39
Tabela 4 – Parâmetros de rugosidade para a amostra mais rugosa. Medidas em três posições (P1, P2 e P3) antes do lixamento50
Tabela 5 - Parâmetros de rugosidade para a amostra mais rugosa. Medidas em três posições (P1, P2 e P3) após o lixamento. A tabela mostra também na última coluna a variação da média em relação a amostra antes lixamento51
Tabela 6 – Parâmetros de rugosidade de Greenwood-Williamson antes d o lixamento para a amostra mais rugosa51
Tabela 7 - Parâmetros de rugosidade de Greenwood-Williamson após d o lixamento para a amostra mais rugosa. A tabela mostra também na última coluna a variação da média em relação a amostra antes lixamento52
Tabela 8 - Parâmetros de rugosidade para a amostra menos rugosa. Medidas em três posições (P1, P2 e P3) antes do lixamento
Tabela 9 – Parâmetros de rugosidade para a amostra 2. Medidas em três posições (P1, P2 e P3) antes e após o lixamento. A tabela mostra também na última coluna a variação da média em relação a amostra antes lixamento52
Tabela 10 - Parâmetros de rugosidade de Greenwood-Williamson antes do lixamento para a amostra com menor rugosidade53
Tabela 11 - Parâmetros de rugosidade de Greenwood-Williamson após o lixamento para a amostra com menor rugosidade. A tabela mostra também na última coluna a variação da média em relação a amostra antes lixamento53
Tabela 12 – Comparação da variação das médias com o lixamento nas amostras com menor e maior rugosidade54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing Materials
COF	Coefficient Of Friction (Coeficiente de atrito)
COFPP	Coeficiente de atrito dos picos ("peak-to-peak")
СОҒмс	Coeficiente de atrito no meio do curso
СОҒм	Coeficiente de atrito calculado pela energia
Fa	Força de Atrito
Fn	Força Normal
α	Fração de área lubrificada
$ au_l$	Resistência ao cisalhamento do lubrificante
τ _a	Resistência ao cisalhamento dos materiais em contato
Ar	Área real de contato
Hm	Dureza do material mais mole
PAO 8	Polialfaolefina 8
5W30	Óleo lubrificante SAE 5W/30
MoDTC	Molybdenum dialkyldithiocarbamate (Dialquilditiocarbamatos de molibdênio)
EHL	ElastoHydrodinamic lubrication (Lubrificação ElastoHidrodinâmica)
Вр	Largura das faixas de microcavidades
TC	Textura completa
TD 1	
1 1 1	Textura parcial 1
TP 1 TP 2	Textura parcial 1 Textura parcial 2
TP 2 RT	Textura parcial 1 Textura parcial 2 Retificado
TP 2 RT LX	Textura parcial 1 Textura parcial 2 Retificado Lixado
TP 1 TP 2 RT LX MEV	Textura parcial 1 Textura parcial 2 Retificado Lixado Microscopia Eletrônica de Varredura
TP 1 TP 2 RT LX MEV SRV	Textura parcial 1 Textura parcial 2 Retificado Lixado Microscopia Eletrônica de Varredura Schwingung Reibung Verscheleiβ (atrito e desgaste oscilatório)

Sumário

1 INT	RODUÇÃO7
2 REV	/ISÃO BIBLIOGRÁFICA11
2.1 A	trito11
2.2 M ALTERN	IEDIDAS DE COEFICIENTE DE ATRITO EM ENSAIOS COM MOVIMENTO ATIVO14
2.3 T	exturização a laser de superfícies (LST)15
2.3.1.	A técnica de ablação a laser15
2.3.2. texturiza	Mecanismos responsáveis pela melhoria no desempenho tribológico com ação a laser16
2.4 L	UBRIFICANTES
2.4.1.	Óleo base
Os óleos	podem ser classificados quanto a sua origem em óleos minerais e óleos sintéticos.
2.4.2.	Aditivos
2.4.2.1. Molibdê	Aditivos modificadores de atrito (com ênfase no Dialquilditiocarbamatos de nio – MoDTCs)19
2.4.2.2.	Efeito da topografia na formação de MoS ₂ 22
2.5 L	UBRIFICAÇÃO23
2.5.1.	Contatos conformes e não conformes23
2.5.2.	Lubrificação hidrodinâmica e elastohidrodinâmica24
2.5.2.1.	Lubrificação hidrodinâmica24
2.5.2.2.	Lubrificação Elastohidrodinâmica24
2.5.3.	Regimes de lubrificação26
2.5.3.1.	Curvas de Stribeck27
3 MA'	TERIAIS E MÉTODOS29
3.1 M	1ATERIAIS

3.2	LUBRIFICANTES	0
3.3	TEXTURAS	1
3.4	EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE ESCORREGAMENTO	3
3.5	EQUIPAMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO	4
3.6	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	5
4 R	ESULTADOS E DISCUSSÕES4	2
4.1. ATRIT	RESULTADOS SOBRE O PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE D O4	E 2
4.1.1.	Coeficiente de atrito "peak-to-peak"4	2
4.1.2. (COF⊮	Coeficientes de atrito nos pontos de inversão (COF _{PP}) e no meio de curs nc) 44	0
4.1.3.	Determinação do coeficiente de atrito pela energia dissipada4	6
4.1.4.	Conclusões sobre os cálculos de COF4	8
4.2.	TEXTURAS A LASER4	8
4.3.	EFEITO DO LIXAMENTO NOS PARÂMETROS DE TOPOGRAFIA4	9
4.4.	EFEITO DA TOPOGRAFIA SOBRE O COEFICIENTE DE ATRITO54	4
4.4.1. com a	Efeito do lixamento de amostras retificadas no COF (comparação das retificada s lixadas)5	.s 4
4.5.	EFEITO DA TEXTURIZAÇÃO NO COEFICIENTE DE ATRITO6	8
4.5.1.	Comparação das texturizadas e lixadas contra as retificadas e lixadas6	8
5 C	ONCLUSÕES	2

1 INTRODUÇÃO

Tribologia é um campo da ciência e tecnologia que engloba o estudo e a compreensão de fenômenos relacionados com atrito, desgaste e lubrificação, em sistemas com interação entre superfícies. É uma área de estudo bastante complexa, uma vez que para o entendimento de tais fenômenos, requer-se a compreensão das geometrias dos corpos em contato, topografia, o comportamento do meio interfacial, os esforços envolvidos, propriedades dos materiais bem como das múltiplas interações entre estas variáveis. (SINATORA, 2005).

A engenharia de superfícies, que estuda formas alternativas de solucionar problemas relacionados com atrito e desgaste de superfícies em contato, tem como seus principais objetivos: aumentar a resistência ao desgaste das superfícies em contato e modificar seu comportamento de atrito (HUTCHINGS, 1992). A Figura 1 sumariza os diversos métodos utilizados em engenharia de superfícies, destacando o objeto de estudos desta dissertação.





O termo texturização superficial define uma superfície *"engenheirada"* contendo padrões geométricos que são projetados para melhorar sua funcionalidade em um

determinado ambiente (PATEL; JAIN; RAMKUMAR, 2016). As melhoras funcionais das superfícies via texturas podem ser verificadas por meio de exemplos na própria natureza, como nas texturas nas patas das rãs, que aumentam a adesão no contato permitindo-as caminhar em superfícies molhadas, ou mesmo as escamas dos tubarões, que reduzem o arrasto hidrodinâmico, fazendo a sua movimentação ser bem mais eficiente (BHUSHAN, 2009).

Em engenharia, o controle nos níveis de atrito e desgaste via texturização pode perfeitamente ser enquadrado como melhora funcional. Um exemplo bem sucedido é o processo de brunimento dos cilindros de motores de combustão interna (JENG, 1996), onde as ranhuras obtidas no processo possibilitam armazenamento de óleo e de *"debris"*, aumentando assim a vida útil do componente.

As pesquisas em texturização com foco principalmente em aplicações nos elementos de máquinas ganharam um novo momento em 1996 com o grupo do pesquisador Etsion, publicando um de seus primeiros trabalhos na área (ETSION; BURSTEIN, 1996). O trabalho descreveu um modelo teórico para contato lubrificado de selos mecânicos, que considerava fluido incompressível e empregava a equação bidimensional de Reynolds juntamente com a condição de contorno de Half-Sommerfeld para cavitação. Essa abordagem permitiu investigar matematicamente o efeito de microcavidades hemisféricas em uma das superfícies, sobre a capacidade de sustentação hidrodinâmica. Eles concluíram que as microcavidades aumentaram a capacidade de suportar carga por meio de cavitações localizadas, e que a seleção apropriada da geometria e da distribuição dessas microcavidades é essencial.

A partir dos resultados promissores encontrados por Etsion, vários estudos teóricos e experimentais têm sido conduzidos de modo a melhorar o desempenho dos contatos tribológicos (Figura 2). Estes estudos tratam de diversas aplicações, incluindo: rolamentos axiais e radiais, mancais, sistema anel/camisa, selos mecânicos, pinos de pistão e ferramentas de corte (GROPPER; WANG; HARVEY, 2016).

Vale ressaltar que a aplicação de texturas depende principalmente do tipo de contato envolvido. O grande número de trabalhos teóricos (Figura 2.b) foi feito sobre aplicações nas quais os contatos são do tipo conforme, para os quais os modelos de escoamento hidrodinâmico são bem estabelecidos e o desempenho do sistema se dá apenas em função do fluido.



Figura 2 – Pesquisas em texturização de superfícies ao longo de 50 anos. (a) Número de publicações por ano; (b) Método de pesquisa. (GROPPER; WANG; HARVEY, 2016)

Contatos do tipo concentrado (ou não-conforme), envolvem pressões de contato bastante elevadas, de modo que tanto as propriedades do fluido quanto a dos materiais tornam-se extremamente relevantes (Lubrificação elastohidrodinâmica - EHL). Neste tipo de contato, os resultados mais promissores de redução de atrito e desgaste mediante texturas são encontrados quando movimento de rolamento está presente, uma vez que no deslizamento puro as bordas das microcavidades ou microcanais ("*grooves*") aumentam a pressão de contato e geram desgaste acelerado do contracorpo (ZHANG, 2014). Sudeep et. al(2015) destaca os principais resultados obtidos ao longo de anos de estudos de contatos concentrados, dentre os quais estão:

- Resultados benéficos em lubrificação limítrofe/mista de elementos de máquina que tem condições de operação com frequentes inicializações/paradas de movimento;
- Melhoria no espalhamento de óleo na superfície;
- Aumento na espessura de filme em condições de rolamento/deslizamento.

Todas as condições discutidas acima operam em contato lubrificado, contudo, poucos estudos de texturização levam em conta a parcela de aditivos existente nos óleos comerciais (OLOFINJANA et al., 2015). Os principais tipos de aditivos e o seu período de desenvolvimento podem ser visualizados na Figura 3.



Figura 3 – Linha do tempo do desenvolvimento de aditivos para lubrificantes. (SPIKES, 2015)

Alguns aditivos são projetados para atuarem nas superfícies de contato, sendo responsáveis por gerar uma camada que reduz os níveis de atrito e desgaste, chamados redutores de atrito (SPIKES, 2015; TANG; LI, 2014). A atuação dos redutores de atito depende das condições da superfície:existência e natureza do filme de óxido (TRINDADE, 2014) ou existência e natureza de uma camada depositada (KOSARIEH et al., 2013; PETTERSSON; JACOBSON, 2003; VENGUDUSAMY et al., 2012)). Alguns estudos (COUSSEAU; RUIZ ACERO; SINATORA, 2016) mostraram que a topografia das superfícies tinha papel determinante na ativação de um tipo especial de modificador de atrito o MoDTC. Com esta inspiração, o trabalho objetiva verificar o efeito da textura superfícial sobre o coeficiente de atito para óleos aditivado e não aditivado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ATRITO

O termo atrito é utilizado para descrever dissipações energéticas que ocorrem no contato entre superfícies em movimento relativo (UETZ, H. 1986). Outra definição refere ao atrito como como uma força tangencial à interface e de sentido contrário ao movimento (BLAU, 2009; HUTCHINGS, 1992). Neste trabalho será usado o conceito de coeficiente de atrito que é relacionado com a energia dissipada no deslizamento.

O atrito é comumente representado por um parâmetro μ o coeficiente de atrito. Este coeficiente é a razão entre a força de atrito F_{at} sobre a força normal F_N.

$$\mu = \frac{F_{at}}{F_N}$$
 Eq. 1

É importante ressaltar o fato de que o atrito é uma saída do sistema em contato, e não uma propriedade dos materiais envolvidos, logo, o coeficiente de atrito depende de entradas do sistema, como: força, velocidade, materiais meio interfacial e textura superficial.

Os eventos químicos e físicos relacionados aos materiais que causam o atrito são chamados de mecanismos básicos de atrito. Alguns mecanismos podem ser afetados também por parâmetros que não são relacionados com os materiais, como força e velocidade. Os principais mecanismos envolvidos (ver Figura 4) são (1) adesão, (2) mecanismo de plowing, deformação e fratura de camadas, tais como as de óxidos, e (3) deformação plástica causada por um terceiro corpo, normalmente chamados de *"debris"*, os quais são gerados no desgaste (ASME HANDBOOK, 1992). Estes mecanismos e outros como a oxidação, a formação de tribofilme (filmes de aditivos) podem ocorrer simultaneamente. Entretanto, muitas vezes, um dos mecanismos é o responsável pelo valor do coeficiente de atrito por preponderar sobre os demais. Tais mecanismos são ilustrados na Figura 4.



Figura 4 – Mecanismos microscópicos que geram atrito. (a) Pontos de interação de asperezas, (b) Plowing e (c) Partículas de desgaste. Adaptado de (ASME HANDBOOK, 1992).

O mecanismo de adesão mencionado acima é referente a formação de junções nos pontos em contato devido a interação física e química das superfícies. Os trabalhos de BOWDEN; TABOR, 1950 apontaram a importância da adesão sobre atrito, a qual é modelada como sendo a força associada ao cisalhamento das junções, e pode ser calculada (para contato seco) por meio do produto da resistência ao cisalhamento dos materiais em questão τ_a e área real de contato A_r.

$$F_a = \tau_a A_r$$
 Eq. 2

para contatos lubrificados:

$$F_a = A_r[\alpha \tau_a + (1 - \alpha)\tau_l]$$
 Eq. 3

е

$$\tau_l = \frac{\eta_l V}{h}$$
 Eq. 4

Assim, o coeficiente de atrito devido a componente de adesão é dado por:

$$\mu_a = \frac{F_a}{F_N} = \frac{A_r[\alpha \tau_a + (1 - \alpha)\tau_l]}{F_N}$$
 Eq. 5

sendo F_N a Força normal, α fração de área não lubrificada, τ_1 resistência ao cisalhamento média do filme lubrificante, η_1 a viscosidade dinâmica do lubrificante, V a velocidade relativa de deslizamento e h a espessura de filme.

BOWDEN; TABOR, 1950 assumiram que as asperezas se deformam até acontecer o escoamento plástico do material mais mole atingindo-se uma pressão de contato igual a essa dureza H_m. Desta forma expressaram a área real de contato como se mostra na equação abaixo:

$$A_r = \frac{F_N}{H_m}$$
 Eq. 6

Logo,

$$\mu_a = \frac{A_r[\alpha \tau_a + (1 - \alpha)\tau_l]}{F_N} = \frac{[\alpha \tau_a + (1 - \alpha)\tau_l]}{H_m}$$
Eq. 7

Desta equação percebe-se que, reduzindo a área real de contato ou aumentando a dureza do corpo mais mole, é possível reduzir o coeficiente de atrito. Outra maneira possível também é a redução da resistência ao cisalhamento da camada superficial e do filme fluido. Essa segunda possibilidade traz à tona a importância dos estudos relacionados a confecção de superfícies e lubrificantes com menores resistência ao cisalhamento para assim obter menores valores de coeficiente de atrito.

A formação de óxidos nas superfícies de deslizamento também pode aumentar ou diminuir a severidade dos níveis de atrito e desgaste, dependendo da dureza e aderência dos óxidos ao substrato (HUTCHINGS, 1992). Bisson et al., 1956 enfatizaram a importância da natureza dos óxidos formados na superfície na lubrificação limítrofe sobre o atrito e os danos na superfície. Além disso, mostrou que filmes de carbono grafítico nos ferros fundidos, wustita (FeO) e magnetita (Fe₃O₄) nos aços podem reduzir atrito e desgaste nos materiais ferrosos. No laboratório de Fenômenos de Superfícies (LFS), o trabalho de (VIÁFARA, 2010) mostrou a importância dos óxidos no deslizamento a seco. ROVANI, 2014 por sua vez, inferiu que em lubrificação limítrofe a fase hematita se forma apenas após a falha do lubrificante. Obara et. al., 2016 destacaram que as condições locais de contato, envolvendo rugosidade, temperatura e pressão são os principais fatores afetando a formação de óxidos e tribofilmes em superfícies de camisas de motor (ferro fundido cinzento), mostrando que nas regiões com maior presença de magnetita e filme de grafita, a taxa de desgaste foi menor.

A revisão acima teve como objetivo destacar os aspectos: conceito de atrito em termos de dissipação de energia, influência da textura superficial e tribofilmes no coeficiente de atrito, importantes para esta dissertação.

2.2 MEDIDAS DE COEFICIENTE DE ATRITO EM ENSAIOS COM MOVIMENTO ALTERNATIVO.

Alguns ensaios de laboratório objetivando medidas de coeficiente de atrito utilizam um aparato que promove o deslizamento com movimento alternado de um corpo sobre outro. O monitoramento dos gráficos de valor instantâneo de COF, de força tangencial ou mesmo de velocidade ou deslocamento gerados em ensaios alternativos apresentam frequentemente resultados inusitados, como indicado na Figura 5. Em alguns casos de deslizamento com movimento alternado, a força tangencial exibe um comportamento assimétrico, diferindo em magnitude ou forma de acordo com o sentido do deslizamento. O perfil de força tangencial pode variar de acordo com o equipamento, meio interfacial, materiais ou filmes finos na superfície.



Figura 5 - Comportamento assimétrico da força de atrito em ensaios alternativos: a) idealizado e b) observado frequentemente, (BLAU, 2009)

Um relatório interno do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS1-011) mostrou que normas ou documentos relacionados a ensaios com movimento alternado não apresentam explicitamente o modo como o COF deve ser calculado e a tendência do usuário é aceitar o resultado fornecido pelo equipamento.

A Norma ASTM D6425, gerada a partir de modificações feitas pelo Comitê alemão da DIN 51834-2 em 2000, tem como foco ensaios executados no equipamento SRV de ensaios alternados. Em seu item 4.2 a norma indica que "valores de pico do coeficiente de atrito são determinados e registrados em função do tempo" em equipamento de gravação ou por aquisição de dados em um computador. Os valores de pico são indicados pelas setas.

O documento ISO/TC 28/SC N2471, "Testing of lubricants — Tribological test in the translatory oscillation apparatus — Determination of tribological quantities for oils and greases in the translatory oscillation apparatus", datado de 11/10/2012, disponível na internet com a indicação de que se trata de documento distribuído para revisão e comentários, indica que o coeficiente de atrito é gerado a partir de medições pico-a-pico de cada período, mas não faz referência a valores médios ou outro tratamento estatístico dos resultados.

Por isso, este trabalho trata dos valores de coeficiente de atrito tanto na forma como é fornecido pelo equipamento, quanto através do perfil médio ao longo do deslizamento.

2.3 TEXTURIZAÇÃO A LASER DE SUPERFÍCIES (LST)

2.3.1. A técnica de ablação a laser.

A palavra ablação tem como significado "ação de tirar", que para este caso se refere à ação de remoção de material da superfície. A técnica LST produz as texturas por um processo conhecido por "laser ablation" (ou ablação a laser), que formam cavidades individuais de ablação por sobreposição de diversos pulsos (DE OLIVEIRA TEIXEIRA; REIS; JANSSEN, 2015).

A duração do pulso de laser é muito importante e pode definir como o processo de remoção de material ocorre. Em lasers do tipo "short-pulse" (SP), com duração do pulso da ordem de nanosegundos, a energia é focada na superfície e é absorvida pelo material, aquecendo-o rapidamente e resultando na fundição e em seguida na vaporização do material. Portanto, ocorre a remoção do material, sendo que cada pulso pode originar uma microcavidade, mas também uma zona termicamente afetada (Figura 6).

Em lasers do tipo "ultra-short-pulse" (USP), com duração do pulso abaixo de 100 femtosegundos, a energia é absorvida pelos elétrons na superfície, mas a duração do pulso é tão curta que a difusão de energia no material é altamente acelerada. Isso resulta na evaporação direta do material na superfície (Figura 6). A remoção de material comparada ao laser de nanosegundo é mais rápida, não existindo zona afetada termicamente, trazendo, portanto, melhor precisão e qualidade na produção de microcavidades.



Figura 6 – Mecanismos físicos em ablação a laser com SP e USP. (DE OLIVEIRA TEIXEIRA; REIS; JANSSEN, 2015)

2.3.2. Mecanismos responsáveis pela melhoria no desempenho tribológico com texturização a laser.

Em seguida apresentam-se os principais mecanismos responsáveis pelas melhorias nas saídas de sistemas tribológicos, principalmente relacionadas a redução no coeficiente de atrito.

Mecanismo de micro-mancais hidrodinâmicos ("micro-bearing effect) – Este primeiro efeito já foi mencionado na introdução desta dissertação no qual as microcavidades aumentam a capacidade de suportar carga por meio de cavitações localizadas, gerando pressões hidrodinâmicas significativas nas regiões convergentes (PROFITO, 2010). A teoria clássica de lubrificação determina que o campo de pressões entre duas superfícies paralelas e planas deve ser nulo em condições de regime permanente (ETSION; BURSTEIN, 1996). Introduzindo uma microcavidade no sistema deslizante (ETSION, 2013), mudanças na espessura local de filme ocorrem nas zonas convergente-divergente, criando um perfil de pressão conforme a Figura 7. A partir de uma velocidade relativa "v" a pressão hidrodinâmica supera pressão ambiente P₀ na zona divergente e diminui abaixo de P₀ na convergente. Em baixas velocidades o perfil formado é simétrico fazendo com que a capacidade seja nula, uma vez que o campo de pressões acima de P₀ é cancelado pelo campo de pressões abaixo de P_a.



Figura 7 – A direita, cavitação observada em uma simples microcavidade esférica mostrando bolhas de ar na saída. A esquerda um simples diagrama esquemático mostrando perfíl de pressão hidrodinâmica gerada no fluido sem a cavitação. Adaptado de (ZHANG, 2014)

A medida que a velocidade aumenta, o perfil de pressão torna-se assimétrico em torno de P₀ uma vez que o valor mínimo de pressão é limitado pela pressão de cavitação Pc do fluido, enquanto a máxima pressão não tem limite, gerando assim pressão resultante positiva, e consequentemente capacidade de sustentação de carga (F>0). Para uma superfície completamente texturizada com várias microcavidades o efeito é aproximadamente igual à soma de cada contribuição individual (KLIGERMAN; ETSION; SHINKARENKO, 2005).

Mecanismo de reservatório de lubrificante ("*oil reservoir effect*") – Este efeito acontece em casos de lubrificação com pouco lubrificante no contato ("starved") onde as microcavidades servem como reservatórios de lubrificantes para alimentar o contato quando o filme lubrificante é quebrado. Ryk et al., 2002 estudaram o efeito de LST sobre estas condições e encontrou que com uma profundidade de microcavidade de 10-11µm e um óleo de baixa viscosidade, as texturas reduzem o coeficiente de atrito sobre todas as condições testadas. Estes resultados também foram presenciados por (LI et al., 2014), percebendo que a aplicação de texturas reduziu o calor gerado no atrito, que era a principal causa do desgaste adesivo.

Mecanismo de retenção de partículas abrasivas ("*debris trap effect*) – Este mecanismo acontece quando os dimples atuam como "trincheiras" que armazenam partículas com potencial abrasivo presentes na interface de contato das superfícies lubrificadas, aumentando assim a resistência ao desgaste e reduzindo o atrito (PROFITO, 2010). Assim como comentado no tópico de atrito, um dos mecanismos responsáveis pelo aumento nos valores de coeficiente de atrito são os "debris" de desgaste, que interferem

no contato de superfícies de deslizamento, sendo responsáveis por elevações de até 50% no valor de coeficiente de atrito (LEITE, 2010; ROVANI, 2014)

2.4 LUBRIFICANTES

Para este trabalho os lubrificantes são definidos como produtos compostos de uma base e vários agentes químicos (chamados de aditivos) que fornecem propriedades aos óleos no seu produto final. Eles contêm alguns aditivos que atuam no volume do óleo base e outros que atuam na superfície dos corpos em contato. Os lubrificantes são formulados com diferentes óleos base, descritos a seguir:

2.4.1. Óleo base

Os óleos podem ser classificados quanto a sua origem em óleos minerais e óleos sintéticos.

Óleos minerais – Obtidos a partir da destilação de petróleo bruto, esses óleos podem ser divididos de acordo com a sua composição química e podem ser parafínicos, naftênicos e aromáticos (MARINHO, 2011). A fração aromática comumente não é desejada, enquanto bases parafínicas e naftênicas são amplamente utilizadas, devido a seu baixo custo e razoável desempenho.

Óleos sintéticos – Lubrificantes sintéticos são obtidos pela síntese de hidrocarbonetos leves com inclusão de alguns elementos orgânicos não petrolíferos (SEABRA; SoTTOMAYOR, 2002). Dentre os básicos sintéticos empregados, os de maior uso são as polialfaolefinas (PAO) e isoparafinas. Em geral, as polialfaolefinas sintéticas têm como vantagens sobre os básicos minerais a maior estabilidade térmica e maior resistência a oxidação, melhores propriedades a baixas temperaturas e menor volatilidade (TRINDADE, 2014).

2.4.2. Aditivos

Levando em consideração a crescente demanda por óleos menos viscosos, principalmente no setor automotivo, os componentes mecânicos tendem a atuar principalmente em regimes misto e limítrofe de lubrificação, uma vez que a espessura de filme lubrificante que separa as superfícies em contato (HAMROCK; SCHMID, 2004) é cada vez menor em decorrência das progressivas reduções das viscosidades dos óleos base. (Seção 2.5.3). Isso então, traz à tona a grande importância de parcela dos aditivos presentes nos óleos lubrificantes comerciais que atuam nos regimes mistos e limítrofes, cada vez mais extensos devido a redução de viscosidade dos óleos. A principal categoria destes aditivos é discutida no item seguinte.

2.4.2.1. Aditivos modificadores de atrito (com ênfase no Dialquilditiocarbamatos de Molibdênio – MoDTCs).

Aditivos modificadores de atrito são adicionados nos lubrificantes de forma a reduzir o coeficiente de atrito em regimes mistos e limítrofe de lubrificação. Segundo SPIKES, 2015, esses aditivos são divididos em quatro principais classes de acordo com seus desenvolvimentos ao longo dos anos. Dentre estas principais classes estão: modificadores de atrito orgânicos ("organic friction modifiers – OFMs"), compostos de molibdênio solúveis em óleo ("oil-soluble, organo-molybdenum compounds"), polímeros modificadores de atrito e nanopartículas.

Dentro da classe compostos de molibdênio solúveis em óleo, 0 Dialquilditiocarbamatos de molibdênio – MoDTC, é um dos modificadores mais utilizados em lubrificantes automotivos, com estrutura química típica conforme a Figura 8. Essas moléculas contêm um núcleo composto por átomos de molibdênio e enxofre e uma parte apolar composta por cadeias de hidrocarbonetos. Os átomos indicados por X da figura podem ser de O ou S, sendo mais comum serem átomos de S nas ligações simples e O nas ligações duplas. O núcleo de Mo-S é o responsável da redução de atrito enquanto a cadeia de hidrocarbonetos é a responsável de conferir solubilidade ao produto (SPIKES, 2015).



Figura 8 – Estrutura típica de um Dialquilditiocarbamato de molibdênio. (SPIKES, 2015)

A característica dos MoDTC na redução do atrito durante o deslizamento é mostrada na Figura 9, onde tem-se inicialmente um valor de coeficiente de atrito 0,13 com uma súbita queda para valores entre 0,03 e 0,05.



Figura 9 – Redução de atrito por MoDTC. MoDTC1 e MoDTC2 diferem nos fornecedores e nos níveis de impurezas (GRAHAM; SPIKES; KORCEK, 2001)

Essa redução de coeficiente de atrito se dá pela decomposição do MoDTC e formação plaquetas ("platelets") de bissulfeto de molibdênio (MoS₂) que são depositadas na superfície metálica, provendo assim uma camada de baixa resistência ao cisalhamento. Um espectro de sinal Raman do MoS₂ é mostrado na Figura 10. Os picos referentes aos diferentes modos de vibração são E_{2g}^1 e A_{1g} , onde E_{2g}^1 envolve a vibração de ambos Mo e S, enquanto que o modo A_{1g} , envolve vibração dos átomos de S longe dos átomos de Mo em ambas as direções da camada de MoS₂ (ver Figura 10).



Figura 10 – (a) Espectro Raman encontrado em uma trilha de ensaio de deslizamento. (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2015) (b) esquema dos modos de vibração E_{2g}^1 e A_{1g} .(SAHOO et al., 2013)

Em seu trabalho, Graham, Spikes e Korcek (2001) por meio de ensaios de deslizamento com movimento oscilatório mostraram que a formação do MoS₂ depende das condições de temperatura, concentração e pressão de contato, e que a formação dessas plaquetas acontece somente nos picos das asperezas, dependendo assim também

da rugosidade. Além disso, os autores identificaram uma correlação entre o coeficiente de atrito e o percentual da superfície recoberto por MoS₂, com o coeficiente de atrito reduzindo à medida que aumenta o depósito de MoS₂. Uma das questões que não estão em consenso, é sobre qual seria o processo de decomposição do MoDTc em MoS₂. Um estudos recente (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2016) acerca das diferentes formas na qual MoDTC se decompõe, sugere que as reações não são movidas somente pela temperatura, mas também pela tensão de cisalhamento, conforme a equação 8 (MAHROVA et al., 2014):

$$k_{tribo} = A_0 \exp \frac{\sigma V - E_a}{k_B T}$$
 Eq. 8

Onde k_{tribo} é taxa constante de reação, A_0 o fator pre-exponencial, σ a tensão de cisalhamento, V constante do material, E_a a energia de ativação, T temperatura e k_B é a constante de Boltzmann. A componente σ providencia uma energia adicional que habilita a decomposição do MoDTC. A importância da tensão de cisalhamento na decomposição tem suporte no trabalho de (ONODERA et al., 2010) onde a decomposição da camada adsorvida de MoDTC acontece somente quando pressão e deslizamento foram aplicadas

O modelo proposto é mostrado na Figura 11, seguindo as seguintes etapas:

- O MoDTC primeiramente adsorve nas superfícies em contato.
- A primeira etapa consiste na ruptura das ligações C-S formando um composto intermediário de molibdênio o qual sofre sulfonação formando MoS_x amorfo.
- O composto MoS_x formado na etapa 1, é convertido em MoS₂, formando a etapa 2. Uma vez que MoS_x é formado em temperaturas mais baixas que MoS₂, a energia de ativação para a formação de MoS_x é menor que a do MoS₂. Assim, MoS₂, pode ser formado a partir de MoS_x, por aumento da energia no contato, ou pela temperatura ou pela tensão de cisalhamento
- FeMoO₄ é formado a partir da reação dos óxidos de ferro na superfície do aço com MoS_x.





Etapa 2 – Depende da tensão de cisalhamento, temperatura e concentração de MoDTC

Figura 11 – Caminho de reação proposto para decomposição de MoDTC em contatos tribológicos. (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2016)

Vale notar na Figura 11 que as reações para formação de FeMoO₄ e MoS₂ são competitivas, considerando a dependência do FeMoO₄ nos óxidos de ferro existentes. Um tema recorrente acerca dos óleos com MoDTC é a relação sinérgica com o aditivo antidesgaste dialkyldithiophosphate (ZDDP). Nos trabalhos de MORINA et al., 2006a, 2006b, foi identificada a presença de MoS₂ nas trilhas de desgaste, mesmo em lubrificantes com adições de ZDDP. Os autores mostraram além disso uma queda mais rápida nos valores de coeficiente de atrito quando os dois aditivos estavam presentes no óleo. Esse comportamento levou a formulação da hipótese de que o ZDDP diminui a taxa de remoção das camadas de MoS₂ da superfície, servindo ao mesmo tempo como fonte de enxofre, que ajudaria na formação das camadas de MoS₂.

2.4.2.2. Efeito da topografia na formação de MoS₂

O efeito da topografia, assim como foi comentado anteriormente, foi analisado previamente em ensaios de deslizamento com movimento alternado (GRAHAM; SPIKES; KORCEK, 2001). Foi encontrado que discos mais rugosos apresentaram menores valores de coeficiente de atrito em regime estável. Este comportamento pode ser relacionado com os estudos de decomposição do MoDTC (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2016), em que a taxa de formação do MoS₂ é diretamente influenciada pela tensão de cisalhamento e temperatura (ver eq. 2), uma vez que superfícies mais rugosas acomodam pressões de contato mais elevadas, pois combinada com deslizamento compõe maior tensão de cisalhamento.

A ativação do efeito redutor do atrito do MODTC pela rugosidade também foi encontrado por Acero, 2015, que ressaltou adicionalmente a importância da textura, verificando que a ativação do MoDTC ocorria apenas quando a direção das linhas de acabamento superficial era ortogonal a direção do movimento. O autor propõe que a força tangencial promove deformação das asperezas quando estas são ortogonais ao movimento, o que nas condições estudadas inibia a quebra do filme de óxido, filme que impedia a decomposição do MoDTC. Em outras palavras a deformação das asperezas ortogonais ao movimento promoveu a formação de superfícies livres de óxidos nas quais o MoS₂ pode formar-se.

2.5 LUBRIFICAÇÃO

O tipo de lubrificação que envolve um determinado sistema tribológico, depende fortemente do tipo de contato envolvido entre os corpos. Os dois tipos de contato existentes, são discutidos a seguir:

2.5.1. Contatos conformes e não conformes

Alguns exemplos simples de contatos conforme e não-conforme podem ser vistos na Figura 12. Em casos de contato conforme, as superfícies dos corpos em contato se encaixam geometricamente uma na outra, de forma que a área aparente de contato é grande em relação as dimensões dos corpos, e a pressão hidrodinâmica é distribuída sobre uma grande área comparada com a espessura de filme lubrificante.

Em casos de contato não-conformes, os dois corpos em contato não se encaixam e a pressão hidrodinâmica é distribuída em uma área relativamente pequena.



Figura 12 - Contato conforme e não – conforme (BJÖRLING, 2014).

Despendendo de qual tipo de contato, conforme ou não conforme, o tipo de lubrificação envolvida torna-se diferente. Assim, os dois tipos de lubrificação nas quais os elementos mecânicos com contato conforme ou não conforme estão sujeitos, são discutidos abaixo.

2.5.2. Lubrificação hidrodinâmica e elastohidrodinâmica

2.5.2.1. Lubrificação hidrodinâmica

Lubrificação hidrodinâmica em geral é caracterizada por superfícies de contato conforme (Figura 12). Sob condições de lubrificação hidrodinâmicas, as superfícies são separadas por um filme fino de lubrificante e a carga normal é suportada por uma pressão positiva gerada no interior deste filme. Essa pressão que suporta a carga resulta de forças viscosas no interior do lubrificante devido ao movimento relativo entre as duas superfícies (HUTCHINGS, 1992).

Para uma pressão positiva ser desenvolvida o filme lubrificante deve estar diminuindo na direção de deslizamento (HAMROCK; SCHMID, 2004), ou seja, o "gap" formado entre as superfícies deve ser convergente (Figura 13).



Figura 13 – Mecanismo de desenvolvimento de pressão para lubrificação hidrodinâmica.

2.5.2.2. Lubrificação Elastohidrodinâmica

Em 1949, Grubin mostrou que a condição simultânea dos efeitos hidrodinâmicos, deformação das superfícies em contato e reologia do lubrificante são fundamentais na análise de contatos não-conformes, dando origem a uma nova área de estudos – Lubrificação Elastohidrodinâmica.

Petrusevich (1951) confirmou os resultados de Grubin e obteve soluções que satisfazem ambas equações de hidrodinâmica e elasticidade das superfícies, para uma ampla gama de condições de operação, e identificou duas importantes características do
contato EHD: (i) O quase paralelismo entre as superfícies deformadas com uma pequena restrição da espessura perto da saída do contato e (i) uma distribuição de pressão quase Hertziana na totalidade do contato com um segundo pico de pressão também junto a saída do contato (Figura 14).



Onde

 T_F – Evolução da temperatura do lubrificante ao longo da direção x.

p – Distribuição da pressão EHD.

A Lubrificação Elastohidrodinâmica (EHD) é fundamental para o entendimento dos fenômenos de lubrificação, de atrito e de dissipação de energia em contatos com elevadas pressões. O estudo deste tipo de lubrificação possibilita avaliar três aspectos cruciais no desempenho de um contato Hertziano lubrificado:

- Determinar a espessura do filme lubrificante gerado entre as superfícies em contato, acompanhada pela deformação elástica dos sólidos.
- ii) Avaliar a força de atrito entre as superfícies em contato devido as deformações visco-elastoplásticas do filme de óleo, levando em conta o comportamento reológico do lubrificante

 iii) Estabelecer o balanço energia do contato, tendo em conta a dissipação de potência no filme lubrificante devido às tensões cisalhantes instaladas.

Em cada tipo de lubrificação, dependendo de parâmetros do óleo e parâmetros como força, temperatura e velocidade, alguns diferentes regimes de lubrificação podem ser encontrados. Tais regimes são diferenciados principalmente em relação a espessura de filme que separa as superfícies, e são discutidos a seguir.

2.5.3. Regimes de lubrificação.

Idealmente, ambos os sistemas hidrodinâmico e elastohidrodinâmico conseguem operar com um filme de fluido de espessura tal que não há contato entre os sólidos. Um sistema operando sob esta condição teoricamente não está exposto ao desgaste e os níveis de atrito são geralmente muito baixos e atribuídos somente ao cisalhamento do lubrificante. Entretanto, se os componentes de elementos de máquinas operam com baixas velocidades de deslizamento e elevados carregamentos, o acabamento das superfícies ou textura superficial desempenha um importante papel, uma vez que os contatos entre asperezas começam a acontecer e consequentemente os níveis de atrito e desgaste são governados pelo conjunto lubrificante e superfície. Uma aproximação é dividir um sistema lubrificado em três regimes; lubrificação limítrofe, lubrificação mista e lubrificação com filme completo.

Regime limítrofe de lubrificação – Devido os sólidos não serem separados pelo lubrificante, os efeitos do filme de fluido são negligenciados e há considerável contato das asperezas (HAMROCK; SCHMID, 2004). O atrito e o desgaste do contato são governados pelas propriedades físico-químicas do filme molecular formado na superfície em combinação com as propriedades dos materiais.

Regime misto de lubrificação – Neste regime os carregamentos externos são sustentados por ambos os efeitos hidrodinâmicos/elastohidrodinâmicos e de contatos de asperezas (BJÖRLING, 2014). Este regime é chamado de misto dado que se encontra uma combinação dos fenômenos próprios dos regimes de filme completo e os fenômenos do regime de lubrificação limítrofe.

Regime de lubrificação com filme completo – Quando não há contato entre asperezas e o contato é totalmente sustentado pelos efeitos hidrodinâmicos. O atrito neste

regime é totalmente sustentado pelas propriedades físicas do lubrificante, mas também pelas propriedades térmicas e elásticas dos sólidos.

2.5.3.1. Curvas de Stribeck

Uma forma comumente utilizada de mostrar os regimes de lubrificação é através das curvas de Stribeck (Figura 15). O coeficiente de atrito é representado pelo eixo y, em função de um parâmetro adimensional, comumente referido como número de Hersey (eixo horizontal), dado por:

$$H = \frac{\eta U}{p}$$
 Eq. 9

onde "η" é o valor da viscosidade absoluta, "U" é a velocidade de deslizamento e "p" é a pressão de solicitação externa.



Figura 15 – Curva de Stribeck, efeito do numero de Hersey no coeficiente de atrito (BJÖRLING, 2014)

Menores números de Hersey representam regime de lubrificação limítrofe, normalmente apresentando elevados coeficientes de atrito. A medida que o número de Hersey aumenta, uma rápida diminuição do coeficiente de atrito ocorre, dando início a uma transição de regime limítrofe para um regime misto, no qual a maior parte do carregamento é sustentada por ações hidrodinâmicas com aumento na espessura de filme (como comentado acima). Quando a espessura de filme é suficiente para evitar colisões das asperezas, um regime de filme completo é formado entre os componentes. É comum encontrar nas curvas de Stribeck um aumento no coeficiente de atrito em relação ao número de Hersey em regimes de filme completo. Este efeito é atribuído ao aumento nas perdas viscosas para casos de lubrificação hidrodinâmica. Já para componentes operando em lubrificação EHD, a curva parece ter pouca diferença em relação ao atrito no regime de filme completo dado as elevadas pressões e diferentes condições térmicas.

A Figura 16 ilustra outra típica curva de Stribeck, exemplificando alguns regimes de lubrificação nos quais elementos de máquinas estão sujeitos. Nesta curva de Stribeck é interessante comentar também sobre o efeito dos diferentes aditivos. No regime limítrofe e misto, aditivos projetados para atuar na superfície, como antidesgaste, modificadores de atrito e estrema pressão terão efeitos mais sobressalentes. Nos regimes de filme completo, aditivos com finalidade de melhorar as propriedades dos óleos terão seus efeitos mais destacados no coeficiente de atrito.



Figura 16 – Curva esquemática de Stribeck: Coeficiente de atrito vs número de Hersey. Para cada regime de lubrificação é mostrado o correspondente aditivo atuante. Estrema pressão ("Extreme Pressure" - EP); antidesgaste ("Anti-Wear" – AW); modificador de atrito ("Frction Modifier" – FM) e melhorador de índice de viscosidade ("Viscosity Index Improve" – VII).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os pares tribológico utilizados nos ensaios foram um segmento reto de anel (fita) de aço inox martensítico AISI 440B utilizado em motores de combustão interna deslizando sobre uma amostra de ferro fundido cinzento, da classe FC-250 (ABNT) usado nos blocos. As dimensões dos corpos de prova (CP) são mostradas na Figura 17.

As amostras de ferro fundido foram retiradas diretamente dos blocos de motores e posteriormente usinadas até estarem com as dimensões especificadas para os ensaios.



Figura 17 - Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de deslizamento

A composição básica desses corpos de prova está indicada na Tabela 1, apresentada a seguir:

Tabela 1	– Composiç	ão química a	aproximad	la (% em pes	so) dos CPs	de ferro fu	ndido (Oba	ra, 2016)
С	Cr	Cu	Mn	Р	S	Si	Sn	Ti
3,34	0,473%	0,018%	0,827	0,339%	0,05%	2,53%	0,005%	0,017%

A Figura 18 mostra microestrutura dos CP's de ferro fundido cinzento utilizados neste trabalho, mostrando os veios de grafita em uma matriz perlítica.



Figura 18 – Microestrutura dos CP's de ferro fundido cinzento com ataque nital 5%.

As fitas utilizadas como contra-corpo tem perfil abaulado nas duas direções. Um perfil típico é mostrado na figura abaixo.



Figura 19 - Topografia típica das fitas utilizados neste trabalho

3.2 LUBRIFICANTES

Os lubrificantes utilizados foram: óleo sintético básico polialfaolefina, identificado como "**PAO 8**" e óleo totalmente formulado SAE 5W-30 SM utilizado em motor de automóvel, identificado como "**5W30**". Algumas propriedades físicas para os dois óleos são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades físicas dos lubrificantes utilizados					
Propriedades	5W30	PAO 8			
Viscosidade cinemática a 40°C (cSt)	53,2	47,1			
Viscosidade cinemática a 100°C (cSt)	9,9	7,90			
Índice de Viscosidade (IV)	166,7	138			

Estes lubrificantes foram escolhidos com intuito de avaliar isoladamente o efeito das texturas aplicadas nos blocos de ferro fundido no atrito lubrificado, bem como avaliar o efeito das texturas e aditivos em conjunto.

3.3 TEXTURAS

As texturas aplicadas neste trabalho foram baseadas no estudo feito por Klingerman, 2005, no qual foram obtidos parâmetros ótimos para texturização parcial em anéis de pistão, aplicando microcavidades nas superfícies via texturização a laser, com um laser do tipo "*Short-Pulse*" (ver seção 2.3.1) . As dimensões ótimas da literatura foram: diâmetro de 75 µm, profundidade de 7µm e fração de área das microcavidades de 50% para textura parcial e 10% para textura completa. Para o cálculo do espaçamento necessário entre microcavidades, de forma a obter-se a fração de área determinada (condições de 50 e 10%), o modelo de célula contendo uma microcavidade no centro foi utilizado (ver Figura 20). Os cálculos do r₁ necessário para as frações de 50 e 10% foram executados mediante equação 1.

$$r_1 = \frac{r_P}{2} \sqrt{\frac{\pi}{S_P}}$$
 Eq. 10

onde r_1 é metade do comprimento da aresta da célula, r_p é o raio da microcavidade e S_p é a fração de área de microcavidades (em %).



Figura 20 – Célula contendo uma microcavidade no centro.

Um esquema da célula contendo uma microcavidade com as dimensões utilizadas é mostrado na Figura 21.



Figura 21 – Célula contendo uma microcavidade, com dimensões baseadas nos resultados de Klingerman, 2005, (a) textura parcial e (b) textura completa.

Foram utilizadas duas distribuições contendo faixas de microcavidades (fração de 50% dentro das faixas) com diferentes espaçamentos (Figura 22.a e Figura 22.b) e uma distribuição com fração de área de 10% (Figura 22.c), todas aplicadas sobre a superfície dos blocos de ferro fundido. Estes diferentes espaçamentos têm por finalidade avaliar o efeito conjunto e efeito isolado das microcavidades no coeficiente de atrito. Uma medição com interferometria 3D mostra o aspecto final das microcavidades (ver Figura 23) utilizadas neste trabalho.



Figura 22 – Espaçamentos e distribuições das microcavidades (a) Bp = 0,357mm, textura TP-1;
(b) Bp = 0,169, textura TP-2 e (c) textura completa com fração de área de 10%, textura TC.



Figura 23 – Topografia da amostra com textura TP-1 por interferometria 3D.

3.4 EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE ESCORREGAMENTO

Foram feitos ensaios tribológicos usando a máquina de movimento alternado (*"reciprocating"*) SRV-4 de fabricação da Optimol, instalada no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, uma vista geral da máquina é mostrada na Figura 24, detalhando a câmara na qual o ensaio é executado.

A máquina SRV-4 permite controlar parâmetros como temperatura (até 900°C), carga (até 2000N), frequência (até 511Hz) e amplitude de oscilação (até 5mm). Mais detalhes de máquinas similares à SRV-4, usadas em ensaios tribológicos lubrificados, podem ser encontrados em normas da ASTM International e DIN (ASTM D6425, ASTM D7421, DIN 51834). Um esquema com os principais componentes da câmara de teste é mostrado na Figura 25.



Figura 24 – (a) Máquina de movimento alternado, (a) Vista geral; (b) detalhe da câmara de teste.



Figura 25 - Esquema da câmara de teste do tribômetro SRV-4: (1) bloco de suporte com sistema piezoelétrico de medição e células de carga; (2) haste de movimento alternado; (3) haste do carregamento de força; (4) resistência térmica; (5) termômetro da resistência; (6) Suporte do anel de teste.

3.5 EQUIPAMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO

As medições de macrodurezas foram realizadas com um durômetro Buehler, modelo VMT-3 e aplicação de carga de 30 kgf durante 15 segundos. Imagens da topografia foram feitas por meio de microscopia óptica (NIKON SMZ800) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um JEOL JSM – 6010LA, com o fim de identificar os possíveis mecanismos de desgaste. O MEV usado também tinha um detector de dispersão de raios X (EDS), o qual permitiu a análise dos elementos químicos próprios de filmes formados pelos aditivos e de óxidos formados no contato de asperezas.

As análises topográficas dos corpos de prova foram efetuadas por meio de interferômetria ótica 3D utilizando equipamento Taylor Hobson CCI MP. Os filmes

formados na interface de contato foram verificados via espectroscopia de sinal Raman, Horiba XploRA, o que permitiu identificar os tipos de compostos formados pelos elementos químicos encontrados nas trilhas de desgaste.

3.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1.1. Medições de rugosidade

A parte inicial dos resultados, trata do efeito que o lixamento promove em amostras retificadas. Para análise, foram medidos os parâmetros nas mesmas posições antes e após o lixamento (Figura 26), em 2 amostras com níveis de Sq diferentes (ambas sujeitas a retifica). Para garantir a medição na mesma posição, uma indentação Vickers foi usada como referência. As medições foram feitas com aumento de 10x, que possui área de 1,71 x 1,71mm. Os ciclos de lixamento foram os mesmos em que as amostras com microcavidades foram submetidas.



Figura 26 - Esquema das posições de medição de rugosidade antes e após o lixamento.

As rugosidades das amostras com texturas foram obtidas por perfis 2D, retirados das regiões entre microcavidades. Esta metodologia foi necessária, uma vez que as microcavidades interferem na medição dos parâmetros 3D, alterando a linha de referência para uma posição abaixo da real (atuam como falsos vales na topografia, ocasionando a redução do valor médio de altura nas medições). Assim, perfis 2D foram traçados em diferentes posições, perpendicularmente as marcas de retífica e lixa. Foram um total de 9 perfis 2D retirados de cada amostra nas posições designadas, na conforme Figura 27. É importante destacar que os perfis 2D foram traçados no mesmo equipamento, onde dentro das medições 3D, por meio do software Tayle-Maps são possíveis traçar perfis 2D.



Figura 27 – (a) Esquema das medições 2D com 9 perfis, sendo 3 em cada posição; (b) esquema com as medições 3D.

3.1.2. Parâmetros de Greenwood & Willianson

Neste trabalho, a determinação dos parâmetros de (GREENWOOD; WILLIAMSON, 1966)será realizada utilizando o programa computacional MAHLE-SUMMITS. Este programa permite os cálculos dos parâmetros de Greenwood a partir do perfil 2D ou a topografia 3D de superfícies reais (ver Figura 28). Os procedimentos de cálculo não são baseados nos momentos espectrais, mas sim numa solução ponto a ponto considerando diretamente todas as alturas de rugosidade. A densidade de asperezas η é calculada computando o número total de asperezas (pontos máximos positivos) localizada acima do plano (ou linha) médio de referência de uma dada topografia (ou perfil). Os valores de Zs e σ são obtidos através do cálculo da média (Zs) e do desvio padrão (σ) das alturas dessas asperezas. Por fim, são calculados os raios dos círculos que passam através do topo de cada aspereza, obtendo-se assim β_s . O tradicional filtro Gaussiano foi utilizado para definição da linha média.



Figura 28 – Ilustração da tela de saida MAHLE-SUMMITS utilizados neste trabalho para o cálculo dos parâmetros de contato de Greenwood: (a) resultados de uma topografia e (b) resultados para um perfil. (PROFITO, 2010).

3.1.3. Parâmetros operacionais dos ensaios de deslizamento.

Os detalhes dos das amostras ensaiadas e dos porta-amostras utilizados são mostrados nas Figura 29 e Figura 30. O suporte do anel possui um eixo de rotação para evitar o desalinhamento no contato. É possível verificar também que o contato está sobre condição "fully-flooded" (totalmente submerso pelo lubrificante) de lubrificação.



Figura 29 – Aspecto macroscópico do: anel reto, bloco de ferro fundido, suporte de fixação do anel e recipiente de óleo onde o bloco é fixado.



Figura 30 – (1) Suporte do anel de teste (vista lateral) (2) recipiente do bloco; (3) óleo lubrificante; (4) segmento de anel; (5) bloco de ferro fundido.

Foram utilizados um anel e um bloco para cada ensaio, sendo que em cada condição foram avaliadas três réplicas. Os anéis passaram por um processo de lixamento com lixa de granulometria #2000 antes dos ensaios, onde após lixados, foram levados ao interferômetro de modo a medir rugosidade e ondulação. Os blocos de ferro fundido, como já mencionados anteriormente, possuem acabamento superficial consequente do processo usinagem (retífica).

Alguns blocos passaram pelo processo de texturização a laser na empresa Lasertools. O laser utilizado é do tipo 'short-pulse', que gera uma zona com rebarbas ao redor das microcavidades. Desse modo, após a texturização os blocos passaram também por um lixamento com lixa #2000 no sentido das marcas de retífica, objetivando a retirada das rebarbas formadas (Figura 31). Foram feitos no total 20 ciclos ou passadas na lixa em cada amostra. No total, foram ensaiadas e analisadas amostras com:

1 - Retifica;

2 - Retífica e lixamento;

3 - Retifica mais texturização e posterior lixamento.

Uma vez que as amostras texturizadas tiveram que passar pelo lixamento, seria equivocado comparar apenas com as superfícies somente retificadas.



Figura 31 – Topografia das texturas (a) antes e (b) após o lixamento.

Os parâmetros de ensaio utilizados são listados na Tabela 3, os quais foram mantidos constantes, com as variáveis sendo restritas apenas as texturas e aos óleos. Os parâmetros foram escolhidos de forma a garantir ativação dos aditivos presentes nos óleos com base em estudos anteriores (ACERO, 2015), e assim avaliar de forma mais clara o efeito das texturas na ativação. Os perfis de velocidade de deslizamento e posição estão apresentados conforme a Figura 32.

Tabela 3 – Condições operacionais utilizadas	nos ensalos de movimento alternado.
Parâmetros	Valores
Força Normal (N)	150 N
Temperatura (°C)	130°C
Amplitude (mm)	5 mm
Frequência	10 Hz
Velocidade média (m/s)	0,1 m/s
Velocidade máxima (m/s)	0,15 m/s



Figura 32 – Variação da posição e velocidade ao longo de um ciclo de deslizamento do anel sobre o bloco em uma frequência de 10Hz.

Deve ficar claro que o equipamento nos disponibiliza valores de COF agrupados segundo dois métodos distintos. O primeiro chamado aqui de FSA ("Friction Signal Analysis") nos quais os dados saem com elevada taxa de aquisição, possuindo um total de 1024 pontos por Stroke. O segundo é obtido a partir dos dados de FSA. Esses parâmetros serão discutidos na parte inicial do capitulo resultados.

3.1.4. Análises Espectroscopia Raman

Esta técnica provém de uma fonte monocromática de luz a qual, ao atingir uma superfície, é espalhada por ela, gerando luz de mesma energia ou de energia diferente da incidente. No primeiro caso, o espalhamento é chamado de elástico e não é de interesse, mas no segundo (espalhamento inelástico) é possível obter muitas informações importantes sobre a composição química do objeto a partir dessa diferença de energia. O interessante é que a diferença de energia entre a radiação incidente e a espalhada corresponde à energia com que átomos presentes na área estudada estão vibrando e essa frequência de vibração permite descobrir como os átomos estão ligados, ter informação sobre a geometria molecular, sobre como as espécies químicas presentes interagem entre si e com o ambiente, entre outras coisas. Dentre as possibilidades, filmes de óxidos ou tribofilmes provenientes do contato de superfícies lubrificadas podem ser identificados por esta técnica. Dependendo do material analisado, alguns parâmetros nos equipamentos de medição devem ser adaptados.

Para este trabalho, análises de sinal Raman nos tribofilmes foram efetuadas em um equipamento Horiba XploRA. O comprimento de onda utilizado foi de 532nm em uma faixa espectral de 100cm⁻¹ a 2000cm⁻¹. O tempo de aquisição de 5s com 5 acumulações

médias mostraram boa razão sinal/ruído. Na grade de difração utilizou-se 1200linhas/mm com aberturas "slit" de 200μm e a "hole" de 500 μm. Um filtro óptico de densidade neutra foi utilizado para limitar a potência do laser em 10% do máximo disponível, suficiente para não gerar danos no filme a ser analisado.

3.1.5. Mapeamento de elementos por raio x.

Mapeamentos de elementos foram executados nas trilhas de ensaios, objetivando análise de elementos provenientes dos lubrificantes utilizados nos trabalhos. O tempo total de cada medida foi de aproximadamente 34min, com 50 varreduras ("sweep time") e tempo de permanência ("dwell time") 0,2ms. A resolução dos mapas foi de 512x384 pixels. A análise utilizada neste trabalho é qualitativa, permitindo apenas a detecção dos elementos. O tempo de análise do raio x (*"dead time"*) estava em 24%, com abertura (*"spot size"*) 60. A voltagem utilizada foi 10kV.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os primeiros resultados a serem analisados são os referentes aos ensaios sem texturização. O objetivo é explicitar como serão apresentados os resultados de coeficiente de atrito uma vez que, como foi mostrado na revisão, há divergência em qual critério (qual valor fornecido pelo equipamento) deve ser usado para analisar os coeficientes de atrito obtidos nos ensaios.

4.1. RESULTADOS SOBRE O PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

Este capítulo da dissertação apresenta e analisa os dados de coeficiente de atrito extraídos do tribômetro optimol SRV em ensaios com óleo lubrificante PAO 8. Esta análise objetiva mostrar que para algumas condições de ensaio (óleo, topografia e parâmetros de velocidade, temperatura e carga) os dados de atrito devem ser tratados de formas distintas para que se possa interpretar os resultados com maior clareza.

4.1.1. Coeficiente de atrito "peak-to-peak".

A Figura 33 mostra os dados de COF em função do tempo extraídos diretamente do tribômetro SRV. Na figura é possível ver que os ensaios executados com óleo PAO 8 apresentam um primeiro regime de valores de COF ascendentes (até 430s aproximadamente), alcançando posteriormente um regime mais estável. Os dados mostrados nesta figura foram obtidos com uma frequência de 1 ponto por segundo e foram designados como COF_{PP}.



Figura 33 – Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies sem textura e óleo lubrificante PAO 8. Duas réplicas do ensaio (E1 e E2).

É importante ressaltar que o equipamento calcula os valores de COF_{PP}, pela média aritmética dos valores de COF nos pontos de inversão do movimento do anel, empregando

dados COF obtidos com maior taxa de aquisição, ao longo de 1 segundo, sendo assim chamados de COF_{PP}, dada a metodologia de cálculo "peak-to-peak". Os valores de COF com alta taxa de aquisição citados previamente, são mostrados em uma curva FSA ("Friction Signal- Analysis"), como mostrado na Figura 34.

O procedimento de cálculo utilizado pelo software do equipamento é indicado por:

$$COF = \frac{|COF_{MAX}^+| + |COF_{MAX}^-|}{2}$$
Eq. 11
$$COF_{PP} = \frac{\sum_{i=1}^{n} COF_i}{n}$$
Eq. 12

onde n é o número de ciclos no período de um segundo. No exemplo o software efetuaria o cálculo com pontos obtidos entre 480,1 a 481,1 segundos



Figura 34 – Exemplo de valores de COF em função do tempo para um ciclo de deslizamento do anel sobre o bloco (Curva FSA). Dados do ensaio 2 efetuados nas superfícies retificadas e lubrificante PAO 8.

Outra forma de mostrar o COF, que não é um procedimento do equipamento, em ensaios nos quais ele é mínimo na posição da máxima velocidade, é calcular a média dos valores a cada meio ciclo, conforme Figura 35.

Como descrito na metodologia, foi feita uma amostragem de dois ciclos completos a cada 120s, perfazendo um total de 30 ciclos em 1 ensaio completo. Para estes ciclos calcularam-se os coeficientes de atrito segundo os dois procedimentos ilustrados nas Figura 34 e Figura 35.



Figura 35 - Exemplo de valores de COF em função do tempo para um ciclo de deslizamento do anel sobre o bloco. Dados do ensaio 2 efetuados nas superfícies retificadas e lubrificante PAO 8.

Os coeficientes de atrito calculados pelos dois procedimentos podem ser vistos na Figura 36. Evidentemente, nas condições estudadas, os valores de COF médios são menores que os calculados pelo procedimento "peak-to-peak". O novo procedimento de cálculo do COF diminuiu a diferença de resultados entre as duas repetições, como se constata qualitativamente da comparação dos dados de COF e COF_{pp} na Figura 36. Isto se deve a quantidade de pontos para o cálculo da média estar mais concentrada na região de maior velocidade, que também é onde a diferença numérica nos valores de COF é menor entre os ensaios.



Figura 36 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies retificadas e óleo lubrificante PAO 8. Valores de COF dados diretamente da SRV (COFPP) e valores médios. Ensaio 1 – E1 e Ensaio 2 – E2.

4.1.2. Coeficientes de atrito nos pontos de inversão (COF_{PP}) e no meio de curso (COF_{MC})

Com o objetivo de capturar o efeito do deslizamento na região central dos ciclos, excluindo os efeitos de fim de curso calculou-se o COF_{MC}. O COF_{MC} é calculado em um

intervalo de tempo de 0,02 segundos na parte central de cada meio ciclo, sendo que cada meio ciclo considerado tem 0,045 segundos. (ver Figura 37). A cada 120s uma média de cinco valores de COF_{MC} foi calculada, conforme a Figura 38.



Figura 37 - Exemplo de valores de COF em função do tempo para um ciclo de deslizamento do anel sobre o bloco. Dados do ensaio 2 efetuados nas superfícies sem textura e lubrificante PAO 8.



Figura 38 – Esquema mostrando cinco ½ ciclos, exemplificando o intervalo de tempo no qual o valor médio de COFMC é calculado

A Figura 39 traz os resultados de COF_{PP} com os valores de COF_{MC} . Percebe-se que entre as réplicas, os valores de COF_{MC} são mais próximos entre do que os valores de COF_{PP} .

A comparação de COF_{PP} com COF_{MC} mostra que os dados de coeficiente de atrito fornecido pelo equipamento (COF_{pp}) tem maiores dispersões entre ensaios do que os calculados pelo método proposto COF_{MC}. Outra constatação é que os resultados de COF_{MC} são semelhantes aos encontrados pela média do perfil (Figura 36), com 0,15 para ensaio 1 e 0,13 para o ensaio 2. Isso mostra que o COF_{pp} é calculado com um número de pontos que representa uma parcela pequena da energia total dissipada ao longo do ciclo. Logo, para mostrar a contribuição do COF_{PP} na energia dissipada ao longo do ciclo segue-se uma análise do trabalho realizado ao longo dos ciclos do equipamento.



Figura 39 - Valores de COF_{PP} e COF_{MC} em função do tempo no deslizamento do anel sobre o bloco. Ensaios efetuados nas superfícies sem textura e lubrificante PAO 8. Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – "Friction Signal Analysis") para os tempos de 360 e 1320s.

4.1.3. Determinação do coeficiente de atrito pela energia dissipada.

Considerando a força de atrito em função do deslocamento, tem-se uma curva conforme Figura 40, a amplitude de movimento foi de aproximadamente 5mm, logo, o anel se desloca de uma posição em x -2,5 até +2,5mm. Multiplicando a força de atrito pelo deslocamento (dx) que é uma das saídas do tribômetro, tem-se o valor do trabalho realizado pela força de atrito para aquele deslocamento dx. A razão entre o trabalho total (Figura 41) e o deslocamento total (somatória dos deslocamentos dx) é igual a força média de atrito. Tendo em mãos a força de atrito e considerando a força normal constante de 150N, é possível obter-se o valor de um COF médio, chamado aqui de COF_M.



Figura 40 – Exemplo de força de atrito em função da posição para ½ ciclo de deslizamento.



Figura 41 – Trabalho total realizado pela força de atrito ao longo de ½ ciclo de deslizamento.

Comparando-se o COF_{PP} com o COF_M (calculado a partir do trabalho realizado) nota-se que o COF_M é expressivamente menor que COF_{PP} devido a este ser computado apenas numa pequena região do ciclo (Figura 42.a). A comparação entre resultados de COF_M entre réplicas mostra que os valores obtidos são mais próximos entre ensaios do que os valores de COF_{PP}. Adicionalmente, a comparação do COF_M com o COF_{MC} mostra que os valores médios são semelhantes (Figura 42.b) sendo que, porém, os valores de COF_M variam menos que os do COF_{MC}.



Figura 42 – Comparação dos valores de COF em função do tempo para um ciclo de deslizamento do anel sobre o bloco. Ensaios efetuados nas superfícies retificadas e lubrificante PAO 8. (a) COF_{PP} e COF_{MC} (igual Figura 39); (b)) COF_{PP} e COF_M calculado em função do trabalho.

4.1.4. Conclusões sobre os cálculos de COF

Ensaios de movimento alternados objetivando comparar eficiência energética entre óleos, materiais, filmes finos ou texturas, devem ser analisados pela ótica conjunta dos gráficos de COF médio, FSA e COF_{PP}. Os valores de FSA fornecem o comportamento do COF ao longo do de cada curso do anel, indicando se o mesmo tem valores mais elevados na inversão (perfil em "U") ou se permanecem constantes. Caso o comportamento seja o perfil em "U" com valores mais elevados na inversão, é necessário obter um coeficiente de atrito médio, para se efetuar a análise sobre a influência das entradas do sistema sobre os valores de COF. Recomenda-se além dos valores de COF_{PP}, uma análise ou pela média do perfil ou pelo trabalho, por meio dos dados de FSA.

Dado que o presente trabalho compara diferentes texturas superficiais e diferentes óleos lubrificantes, foram analisados COF_{PP} em conjunto com as curvas FSA, obtendo-se COF médio com o trabalho realizado pelo deslocamento do anel (COF_M), uma vez que os valores de COF_M mostraram menor variação em relação com o COF médio ou com COF_{MC}.

4.2. TEXTURAS A LASER

A Figura 43.a mostra a perfilometria 3D de uma amostra após a texturização e o lixamento. Os valores médios medidos dos diâmetros foram de $76\pm0,3$ µm e o planejado foi de 70µm, mostrando diferença percentual de ~8%. Já os valores obtidos de profundidade foram de $10 \pm 0,1$ µm e os planejados de 7µm, com diferença percentual

entre de ~40 %. Vale ressaltar que as dimensões das microcavidades não variam entre as texturas selecionadas e o regime de lubrificação dos ensaios alternativos é limítrofe. Essas características fazem com que as profundidades com valores de $10\mu m$ não interfiram no objetivo do trabalho.



Figura 43 – (a) Perflometria 3D de uma amostra texturizada a laser (b) Dimensões das microcavidades.

4.3. EFEITO DO LIXAMENTO NOS PARÂMETROS DE TOPOGRAFIA

Assim como comentado em materiais e métodos, as amostras texturizadas a laser passaram por uma etapa posterior de lixamento para a remoção das rebarbas que se formaram no processo de ablação. Logo, para ter uma referência de superfícies sem textura, foram analisados os efeitos do lixamento sobre superfícies apenas retificadas, por meio de perfilometria 3D.

As topografias de duas amostras lixadas são mostradas na Figura 44, com áreas de aproximadamente 1,68 x 1,68mm². A amostra 1 tinha Sq de 2,4 \pm 0,25µm enquanto que a amostra 2 Sq de 0,21 \pm 0,03µm. A principal alteração visível nas amostras é a remoção dos picos das asperezas. Análise das amostras com maior rugosidade (amostra 1) e com menor rugosidade (amostra 2) são detalhadas a seguir.



Figura 44 – Perfilometria 3D a amostras retificadas com níveis diferentes de rugosidade. A amostra com maior rugosidade foi chamada de 1 e a com menor rugosidade foi chamada de 2. As setas indicam as mudanças na morfologia dos picos de asperezas com o lixamento.

Amostra mais rugosa

A Tabela 4 mostra os valores dos parâmetros de rugosidade antes do lixamento. Já a Tabela 5 mostra os parâmetros nas mesmas posições após o lixamento .

		unic	is do inaune	into.		
	P1	P2	Р3	Média	Desvio	CV%
Sa	2,312	1,907	1,837	2,02	0,26	12,7
Sq	2,762	2,438	2,355	2,52	0,22	8,5
Ssk	-0,3939	-0,6923	-0,6602	-0,58	0,16	-28,1
Sku	2,343	3,367	3,268	2,99	0,56	18,9
Vmp	0,06962	0,08094	0,07431	0,07	0,006	7,9
Spk	0,9788	1,356	0,7513	1,03	0,305	29,7

Tabela 4 – Parâmetros de rugosidade para a amostra mais rugosa. Medidas em três posições (P1, P2 e P3) antes do lixamento.

	P1	P2	Р3	Média	Desvio	CV%	Variação
Sa	2,28	1,738	1,642	1,89	0,34	18,2%	-6,5%
Sq	2,679	2,203	2,164	2,35	0,29	12,2%	-6,7%
Ssk	-0,5122	-0,9673	-1,028	-0,84	0,28	-33,7%	43,6%
Sku	2,255	3,562	3,673	3,16	0,79	24,9%	5,7%
Vmp	0,04064	0,03514	0,0104	0,03	0,016	56,1%	-61,7%
Spk	0,09867	0,3093	0,3055	0,24	0,121	50,7%	-76,9%

Tabela 5 - Parâmetros de rugosidade para a amostra mais rugosa. Medidas em três posições (P1, P2 e P3) após o lixamento. A tabela mostra também na última coluna a variação da média em relação a amostra antes lixamento.

Os principais resultados são:

1- A distribuição de rugosidades fica praticamente com a mesma curtose, mas a assimetria fica mais negativa, o que corresponde a uma cauda a direita menor (da distribuição de alturas). Isso é coerente com a supressão de picos pelo lixamento.

2 – A redução significativa de Vmp (volume de material de picos) e Spk (dobro da altura média dos picos) demonstra bem o efeito do lixamento.

 3 – O aumento da curtose é pouco expressivo e fica difícil dizer se resulta da diminuição de picos diante da dispersão de resultados da ordem de 20%.

4 – As reduções de Sa e Sq da ordem de 7% são pequenas diante das dispersões.

5- O lixamento não altera muito a dispersão das medições, exceto no caso dos parâmetros Vmp e Spk.

Análise dos parâmetros de Greenwood e Williamson mostradas nas Tabela 6 e Tabela 7 (GREENWOOD; WILLIAMSON, 1966), indicam:

1 - Aumento percentual na dispersão dos resultados.

- 2 Redução na altura média das asperezas (Zs)e no desvio padrão das alturas (σZs)
- 3 Aumento no número de contatos (η_s) e no raio médio das asperezas (β_s).

Tabela 6 – Parâmetros de rugosidade de Greenwood-Williamson antes d o lixamento para a amostra mais

			Tugosa.			
	P1	P2	Р3	Média	Desvio	CV%
Zs(µm)	2,6	2	2	2,20	0,35	15,7%
σZs(μm)	1,4	1,3	1,3	1,33	0,06	4,3%
βs(µm)	10,4	10,5	9,9	10,27	0,32	3,1%
ηs(m ⁻²)	5,30E+09	5,90E+09	5,80E+09	5,67E+09	3,21E+08	5,7%

			1110	annennee.			
	P1	P2	Р3	Média	Desvio	CV%	Variação
Zs(µm)	2,5	1,8	1,6	1,97	0,47	24,0%	-10,6%
σZs(µm)	1,1	0,9	0,9	0,97	0,12	11,9%	-27,5%
βs(µm)	14,3	12,9	14	13,73	0,74	5,4%	33,8%
ηs(m-2)	5,90E+09	6,90E+09	6,90E+09	6,57E+09	5,77E+08	8,8%	15,9%

Tabela 7 - Parâmetros de rugosidade de Greenwood-Williamson após d o lixamento para a amostra mais rugosa. A tabela mostra também na última coluna a variação da média em relação a amostra antes lixamento.

Amostra menos rugosa

A Tabela 8 mostra os valores dos parâmetros de rugosidade antes do lixamento. Já a Tabela 9 mostra os parâmetros nas mesmas posições após o lixamento .

Tabela 8 - Parâmetros de rugosidade para a amostra menos rugosa. Medidas em três posições (P1, P2 e P3) antes do lixamento.

	P1	P2	Р3	Média	Desvio	CV%
Sa	0,1846	0,1273	0,202	0,17	0,04	22,8%
Sq	0,2375	0,2168	0,2591	0,24	0,02	8,9%
Ssk	-0,2584	-0,1058	-0,3236	-0,23	0,11	-48,8%
Sku	3,688	3,027	3,568	3,43	0,35	10,3%
Vmp	0,01127	0,01025	0,01167	0,01	0,001	6,6%
Spk	0,2062	0,216	0,612	0,34	0,232	67,2%

Tabela 9 – Parâmetros de rugosidade para a amostra 2. Medidas em três posições (P1, P2 e P3) antes e após o lixamento. A tabela mostra também na última coluna a variação da média em relação a amostra antes lixamento.

			anteeb	mamento			
	P1	P2	Р3	Média	Desvio	CV%	Variação
Sa	0,1518	0,1485	0,1713	0,16	0,01	7,8%	-8,2%
Sq	0,1958	0,1921	0,2032	0,20	0,01	2,9%	-17,1%
Ssk	-0,7003	-0,7832	-0,9271	-0,80	0,11	-14,3%	250,5%
Sku	3,98	4,155	4,059	4,06	0,09	2,2%	18,6%
Vmp	0,006969	0,006705	0,00619	0,01	0,000	6,0%	-40,2%
Spk	0,1265	0,1336	0,1275	0,13	0,004	3,0%	-62,5%

As análises das amostras com menor rugosidade:

1- A assimetria da distribuição de rugosidades aumentou, como esperado, considerando que o lixamento é um processo manual.

2 – A redução de Vmp e Spk demonstra o efeito do lixamento, porém menor que na amostra mais rugosa.

 3 – A dispersão dos resultados não se alterou muito com o lixamento, exceto no caso de Spk.

Os parâmetros de Greenwood e Williamson (GREENWOOD; WILLIAMSON, 1966) para a amostra menos rugosa indicam:

- 1 Diminuição percentual na dispersão dos resultados.
- 2 Redução na altura média das asperezas (Zs)e no desvio padrão das alturas (σZs)
- 3 Aumento no número de contatos (η_s) e no raio médio das asperezas (β_s).

Tabela 10 - Parâmetros de rugosidade de Greenwood-Williamson antes do lixamento para a amostra com menor rugosidade

	P1	P2	Р3	Média	Desvio	CV%
Zs(µm)	0,26	0,25	0,3	0,27	0,03	9,8%
σZs(μm)	0,16	0,15	0,18	0,16	0,02	9,4%
βs(µm)	15,34	16,05	15,81	15,73	0,36	2,3%
ηs(m ⁻²)	1,20E ⁺¹⁰	1,20E ⁺¹⁰	1,10E ⁺¹⁰	1,17E ⁺¹⁰	5,77E ⁺⁰⁸	4,9%
	1,201	1,201	1,101	1,1/1	5,776	4,770

Tabela 11 - Parâmetros de rugosidade de Greenwood-Williamson após o lixamento para a amostra com menor rugosidade. A tabela mostra também na última coluna a variação da média em relação a amostra antes livamente.

	P1	P2	Р3	Média	Desvio	CV%	Variação
Zs(µm)	0,21	0,2	0,22	0,21	0,01	4,8%	-22,2%
σZs(μm)	0,11	0,11	0,12	0,11	0,01	5,1%	-30,6%
βs(µm)	17,43	17,81	19,12	18,12	0,89	4,9%	15,2%
ηs(^{m-2})	1,40E+10	1,40E+10	1,30E+10	1,37E+10	5,77E+08	4,2%	17,1%

Pelos resultados mostrados, o efeito do lixamento tanto na amostra de maior rugosidade como na de menor rugosidade, mostraram a redução da altura média e desvio padrão dos picos das asperezas, bem como aumento no raio e no número de contatos. Porém, como mostrado na Tabela 12 aumentos percentuais do desvio padrão e a redução nos números de contato foram semelhantes para as duas amostras, porém a amostra com maior rugosidade foi mais afetada no aumento de β_s de 30% em comparação com os 15% da amostra 2. Esses valores estão significativamente ligados a pressão de contato no par tribológico, indicando que o processo de lixamento para retirada de rebarbas pode contribuir fortemente com as condições de contato.

	i ugosidade.						
	Variação na	Variação na					
	amostra 1	amostra 2					
Zs(µm)	-10,6%	-22,2%					
σZs(μm)	-27,5%	-30,6%					
βs(µm)	33,8%	15,2%					
ηs(m ⁻²)	15,9%	17,1%					

Tabela 12 – Comparação da variação das médias com o lixamento nas amostras com menor e maior

4.4. EFEITO DA TOPOGRAFIA SOBRE O COEFICIENTE DE ATRITO

4.4.1. Efeito do lixamento de amostras retificadas no COF (comparação das retificadas com as lixadas)

4.4.1.1. Ensaios com óleo não aditivado

Na Figura 45.a tem-se os valores de coeficiente de atrito (COF_{PP}) em função do tempo para ensaios lubrificados com PAO 8 em superfícies apenas retificadas (RT) de ferro fundido cinzento. Nas três réplicas, percebe-se um primeiro período no qual COF_{PP} cresce até aproximadamente 430s. Após esse primeiro período, as três réplicas apresentam valores de COF_{PP} mais estáveis, principalmente no ensaio 3. Os ensaios referentes às réplicas 1 e 2 tiveram tendência de decréscimo nos valores de COF_{PP}. O ensaio 3 mostrou também maior amplitude de variação dos valores de COF_{PP} ("ruído") e maior valor médio no segundo período (média de 0,28), seguido pelo ensaio 1 com média de 0,23 e ensaio 2 com média 0,21. A duração dos ensaios (30min) não foi suficiente para verificar se o segundo período registrado tende a estabilizar completamente.

Os ensaios em superfícies lixadas tem seus valores de COF_{PP} mostrados na Figura 45.b. Assim como nos ensaios com blocos retificados, os ensaios 1 e 3 mostraram dois períodos, sendo o primeiro (anterior a 430s) com valor crescente de COF_{PP} e o segundo com valores mais estáveis. O ensaio 2 mostrou um comportamento crescente até o final do ensaio. Os ensaios também mostraram amplitude de variação do COF_{PP} consideravelmente reduzidas, quando comparadas com superfícies somente retificadas. O valor médio de COF_{PP} para todas as réplicas dos ensaios foram 0,17 para o primeiro ensaio, 0,18 e 0,17 para o segundo e terceiro, respectivamente.



Figura 45 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies (a) retificadas (RT) e (b) retificadas+lixadas (LX). Oleo lubrificante PAO 8. A numeração ao lado de RT e LX é referente a réplica do ensaio.

Para um intervalo de 0,25s nos tempos próximos a 480 e 1680s, uma análise mais detalhada do sinal de atrito (FSA) é apresentada na Figura 46. As curvas têm perfil em "U" e o COF tem maior valor nos pontos de inversão (velocidade é zero), diminuindo subitamente à medida que a velocidade aumenta. Comparando os ensaios, nota-se que a diferença mais significativa dos valores se encontra justamente no ponto de inversão, sendo este efeito ainda mais notório no gráfico de 1680s.



Figura 46 – Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com PAO 8. Amostras somente retificadas.

Já os valores de FSA nos ensaios com PAO 8 e amostras lixadas (Figura 47), é possível ver uma considerável redução dos picos nos pontos de inversão (comparadas as amostras retificadas), indicando que o processo de lixamento tem bastante efeito no COF_{PP}, em ensaios sem aditivos.



Figura 47 – Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com PAO 8. Amostras retificadas + lixadas.

O resultado do cálculo de COF pela energia dissipada (COF_M), conforme descrito na seção anterior, é observado na Figura 48. Observam-se (Figura 48.a) que os valores de todas as réplicas tiveram uma considerável redução do COF_M no final de todo o ensaio (comparados ao COF_{PP}), com valores entre 0,14 e 0,16. A réplica 2 nos ensaios com PAO 8 mostrou um aumento na primeira metade do ensaio (~0,16), se igualando as demais réplicas a partir de 1200s aproximadamente. A discrepância entre as réplicas também diminuiu, principalmente após 1500s, onde os valores tentem a permanecer em 0,15 para todos os ensaios.



Figura 48 – Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies (a) retificadas (RT) e (b) retificadas+lixadas (LX). Oleo lubrificante PAO 8. A numeração ao lado de RT e LX é referente a réplica do ensaio. Cálculo pelo método da energia.

O parâmetro de altura Rq das superfícies antes do ensaio são mostrados na Figura 49. Percebe-se que as amostras lixadas nos ensaios com PAO 8 tem valores de Rq bem menores comparados com as amostras retificadas. Assim, a rugosidade tem efeito na redução tanto dos picos de COF nas inversões (Figura 47) como no COF_M da Figura 48.



Figura 49 – Parâmetros de altura Rq para as amostras de ferro fundido antes dos ensaios. Valores referentes as réplicas 1,2 e 3 dos ensaios com PAO 8 em superfícies retificadas e retificadas+lixadas. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita.

Análise de MEV da superfície retificada mostra claramente aspecto de contato plástico sobre a superfície (Figura 50). Nas marcas de contato, o mapa de EDS da (Figura 51) mostra que a parte deformada tem oxigênio, indicando a formação de óxido no contato.



Figura 50 – Trilhas de ensaio de amostras de ferro-fundido ensaiadas com PAO 8. Ensaio 1. (a) superfície retificada; (b) superfície retificada e lixada. As setas indicam a região deformada plasticamente e possível formação de óxidos.



Figura 51 – Mapa de elementos da trilha de desgaste na superfície de ferro-fundido retificada, ensaiada com óleo PAO 8. Ensaio 1.

As medições com espectroscopia Raman mostraram espectros conforme o da Figura 52. Segundo (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2015), com picos observados em 214, 282, 404, 605cm⁻¹ e 1304 cm⁻¹ são atribuídos a formação de Fe₂O₃. O pico em 660cm⁻¹ indica a formação de Fe₂O₄ juntamente com Fe₂O₃, conforme ilustrado na Figura 53 (STEHLE et al., 2011). Em todas as medidas foram encontrados espectros semelhante à Figura 52.



Figura 52 – Espectro característico raman observado nas superfícies oxidadas. Ensaio com óleo PAO 8 e superfície retificada.



Figura 53 –(a) Espectro raman característico de Fe₃0₄. (b) Espectro raman característico de Fe₂0₃.(c) Espectro característico da formação de Fe₂O₄ juntamente com Fe₂O₃. (STEHLE et al., 2011).

4.4.1.2. Ensaios com óleo aditivado

Na Figura 54.a observa-se o comportamento do COF_{PP} para ensaios com óleo 5W30 e superfícies apenas retificadas. No gráfico é possível ver uma queda acentuada nos valores de COF_{PP} em todas as réplicas. Para o ensaio 1, os valores de COF_{PP} permanecem mais estáveis até 750s com valor médio de 0,16, quando subitamente tem uma redução para valores de 0,08. As réplicas 2 e 3 mostraram comportamento similar entre si, porém, diferente da réplica 1. Nestes dois ensaios o valor médio inicial de COF_{PP} foi 0,15 e a queda foi menos acentuada, iniciando antes (100s). O tempo de ensaio também não foi suficiente para alcançar um regime estável de COF_{PP}, com valor final de 0,09.

A Figura 54.b por sua vez mostra os resultados obtidos nos ensaios com superfícies lixadas e óleo 5W30. Percebe-se um regime estável de COF_{PP} ao longo de todo o ensaio, com valor médio de 0,13. Nestas condições de ensaio, nota-se que o coeficiente de atrito não mostrou a queda em seus valores, característica da formação de MoS₂.



Figura 54 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies lixadas (RT) e óleo lubrificante (a)PAO 8 e (b) 5W30. A numeração ao lado de Lix é referente a réplica do ensaio.

A queda nos valores de atrito para a Figura 54.a estão relacionadas com a decomposição do MoDTC contido no óleo e formação de uma camada de MoS₂ na superfície, camada esta que possui baixa resistência ao cisalhamento, conforme (ACERO, 2015; GRAHAM; SPIKES; KORCEK, 2001).

Nos ensaios com óleo 5W30, para a segunda réplica não foi possível obter os valores de FSA devido a erro do software em gravar os dados. Vale ressaltar que é um tipo de erro da máquina que acontece esporadicamente, com motivo desconhecido, assim, sempre quando forem mostradas apenas 2 repetições dentre as 3, 1 destas teve seu arquivo FSA corrompido.

Os resultados referentes aos ensaios 1 e 3 são mostrados na Figura 55. Nota-se que o comportamento do COF é bastante estável ao longo do trajeto do anel, mostrando com mais detalhe o efeito dos aditivos sobre a redução no coeficiente de atrito, principalmente nos pontos de inversão (comparados aos ensaios com PAO 8). A redução dos valores médios de COF entre as figuras a e b para cada semi-ciclo, está associada a formação da camada de MoS₂, conforme comentado acima.



Figura 55 - Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com 5W30.

Outro resultado interessante é que no ensaio 1, o tempo de 30min não foi suficiente para estabilização do atrito, diferentemente do ensaio 3. Isso fica mais evidente nas curvas de FSA de COF em função da posição mostradas na Figura 56. As curvas azuis mostram os valores de coeficiente de atrito nos tempos entre 0 e 1080s e as curvas verdes entre 1200 e 1800s. Nota-se no ensaio 3 que todas as curvas verdes se sobrepõem, indicando estabilidade entre os ciclos, uma vez que a partir de 1200s os valores de COF foram iguais. No ensaio 1 as curvas tentem ainda a apresentar menores valores ao passar do tempo.


Figura 56 – Dados de FSA - COF em função da posição para ensaios com 5W30. (a) Ensaio 1 e (b) ensaio 3. Valores referentes a 2 ciclos e meio obtidos a cada 120 segundos de ensaio. Linhas azuis são valores de COF nos tempos de 120 a 1080s e as linhas verdes de 1200 a 1800s.

Os valores de COF (Figura 57) das amostras lixadas mostraram comportamento semelhante aos da amostras retificadas (Figura 55), com perfil estável ao longo do percurso. Entretanto, a amplitude de variação do COF (ou "ruído") nos ensaios com superfícies somente retificadas foi mais acentuada.



Figura 57 - Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com 5W30.

Os valores de COF_M (Figura 58.a) foram menores que os valores de COF_{PP}, como por exemplo no ensaio 1, caindo no período inicial de 0,15 para 0,14 e no final de 0,08 para 0,07. Já os resultados dos testes com superfícies lixadas, os valores caíram de 0,13 para 0,12.



Figura 58 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies (a) retificadas (RT) e (b) retificadas+lixadas (LX). Oleo lubrificante 5W30. A numeração ao lado de RT e LX é referente a réplica do ensaio. Cálculo pelo método da energia.

O lixamento também afetou os resultados de COF^M para os ensaios com 5W30, em relação aos ensaios com superfícies somente retificadas (Figura 58.b). Como visto acima nestes não foram observadas diminuição de COF ao longo do ensaio. Mas é interessante notar que os ensaios de superfícies lixadas responderam com menor valor de COF^M comparados as superfícies retificadas, nos períodos precedentes a formação de MoS₂ (mudança de 0,13 para 0,12).

A Figura 59 mostra os valores de Rq das amostras que utilizaram 5W30 no ensaio. Os ensaios 2 e 3 das condições lixadas possuem valores de Rq semelhantes aos ensaios com superfície retificada (1,19 e 1,05μm), e mesmo assim não foi observada a queda nos valores de atrito características da formação de MoS₂. As diferenças de Rq entre réplicas das amostras lixadas não tiveram influência nos valores de COF, dado que a amostra do ensaio 1 tinha valor de 0,28μm e o segundo ensaio, 1,19μm. Este resultado indica que apenas os parâmetros de altura podem não ser suficientes para avaliar a formação de MoS₂ na superfície.



Figura 59 - Parâmetros de altura Rq para as amostras de ferro fundido retificadas e retificadas + lixadas. Valores referentes as réplicas 1,2 e 3 dos ensaios com 5W30. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita.

Análises de MEV na superfície das amostras Figura 60, novamente indicam contato plástico nos ensaios com superfícies retificadas, o que segundo (ACERO, 2015) é uma das condições para formação da camada de MoS₂. O EDS na trilha do ensaio 1 com 5W30 indica também a presença de elementos próprios de aditivos usados na formulação de lubrificantes automotivos, como Zn, P, Ca e Mo. Todas as análises de EDS das amostras ensaiadas com 5W30 mostraram os mesmos elementos na trilha de ensaio. Esses elementos possivelmente indicam a formação de uma camada com propriedades anti-desgaste que torna possível a deposição de uma camada de MoS₂ (MORINA et al., 2006a).



Figura 60 – Mapa de elementos da trilha de desgaste na superfície de ferro-fundido ensaiada com óleo 5W30. Ensaio 1. A seta indica uma região com deformação plástica.

Medições de espectroscopia de sinal Raman nos ensaios com superfícies retificadas confirmam a formação de MoS₂ nas trilhas de desgaste, conforme a Figura 61.a. Os picos E_{2g}^1 e A_{1g} podem ser observados em valores de 380cm⁻¹ e 405cm⁻¹, semelhante ao encontrado em (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2015) na Figura 61.b.





Além dos espectros característicos de MoS₂, foram encontrados espectros conforme Figura 62. Apesar da semelhança, este tipo de espectro, além de mostrar os picos característicos E_{2g}^1 e A_{1g} , possui um pico mais alargado (ou banda) na região com 337cm⁻¹. Segundo (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2016), o pico na região próxima a 335cm⁻¹ é referente a vibração de v(Mo-S) em uma estrutura contendo ligantes S_2^{2-} , que somado ao pico em 453cm⁻¹ indica formação de compostos amorfos de molibdênio ricos em enxofre, ou MoS_x(x>2). Porém, quando o pico A_{1g} está presente em aproximadamente 404cm⁻¹, pode-se atribuir tal espectro a uma mistura de MoS₂ com MoS_x, que conforme mostrado no modelo de decomposição do MoDTC (capítulo 2.4.2.1**Erro! Fonte de referência não encontrada**.), é o precursor do MoS₂.



Figura 62 – Espectro raman com pico em 337cm-1. Ensaio com superfície somente retificada e óleo 5W30.

Analisando a topografia por MEV para os ensaios com superfícies lixadas, percebese também a formação de faixas com marcas de deformação plástica, semelhante aos ensaios com superfícies apenas retificadas. Entretanto, as medidas de largura das faixas deformadas mostram uma variação entre 80-120µm nas superfícies apenas retificadas e 10-30µm nas superfícies lixadas.



Figura 63 – (a) Faixa de desgaste da amostra retificada, ensaiada com óleo 5W30 ensaio 1; (b) faixa de desgaste da amostra lixada, ensaiada na condição 5W30 ensaio 1.

Fazendo o mapa de elementos da superfície (Figura 64), tem-se a presença dos mesmos elementos encontrados nos ensaios das superfícies retificadas, indicando que nas faixas deformadas também há formação de um filme anti-desgaste que dá suporte para a camada de MoS₂.



Figura 64 – Mapa de elementos da trilha de desgaste na superfície lixada de ferro-fundido, ensaiada com óleo 5W30. Ensaio 1.

Medidas de espectroscopia raman da superfície confirmam os espectros de MoS₂ sobre a superfície de ensaio. O espectro de MoS₂ encontrado é mostrado na Figura 65.a.

Nota-se que os picos E_{2g}^1 e A_{1g} são praticamente idênticos aos encontrados nas superfícies somente retificadas, com os mesmos valores de 380 e 405cm⁻¹. A Figura 65.b mostra o espectro de MoS₂+MoSx, verificado também na condição anterior. Os resultados mostram que, mesmo o coeficiente de atrito não apresentando uma queda para valores abaixo de 0,1, há MoS₂ nas camadas deformadas citadas anteriormente.



Figura 65 –Espectros raman da trilha de desgaste na superfície de ferro-fundido lixada, ensaiada com óleo 5W30. Ensaio 1 (a) MoS2 e (b) MoS2+MoSx.

No trabalho de (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2016), os valores finais de COF foram relacionados aos produtos da decomposição do MoDTC, como o MoS_x, em diferentes condições de carga e temperatura, ver Figura 66. Pela Figura 66 é possível observar que os maiores valores finais de COF foram relacionados com formação de MoS_x, para os ensaios menores cargas (0,98GPa) e menores temperaturas(20°C).



Figura 66 – Coeficiente do atrito em função do tempo com diferentes (a) temperaturas e (b) Pressões de contato. Espectros raman para diferentes (c) temperaturas e (d) Pressões de contato. Ensaios esferasobre-disco (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2016)

O modelo de decomposição do MoDTC (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2016; ONODERA et al., 2010) apresentado na revisão bibliográfica sugere que a energia necessária para conversão de MoS_x em MoS_2 necessita de um determinado cisalhamento (σ na eq. 8), que é complementar a temperatura. Este trabalho mostra que o tipo de topografia pode contribuir também na energia necessária para tal conversão, especificamente a rugosidade nos picos das asperezas.

$$k_{tribo} = A_0 \exp^{\frac{\sigma V - E_a}{k_B T}}$$
 Eq. 8

A rugosidade no pico das asperezas é representada aqui pelo raio médio das asperezas β s e pelo dobro da altura média dos picos Rpk. Os valores de β s para as amostras retificadas e lixadas são mostrados na Figura 67.a. Como foi verificado anteriormente na secção 4.3, o processo de lixamento resulta no aumento no raio médio β s das asperezas, independente dos valores de Rq. Os resultados de Rpk por sua vez, mostraram valores até 67% menores nas amostras lixadas em relação as retificadas.

Os resultados obtidos mostram que superfícies com asperezas de menor raio médio e maior altura média dos picos (retificada) obtiveram menor valor final de coeficiente de atrito (0,07). Já as amostras lixadas, com maior raio e menor altura, mostraram valores mais elevados de coeficiente de atrito (0,13) no final do ensaio, mesmo em ambos os casos serem detectados filmes de MoS₂ e MoS_x.



Figura 67 – (a) Valor do raio médio das asperezas βs para amostras somente retificadas e amostras retificadas + lixadas ensaiadas com 5W30. (b) Parâmetro funcional R_{pk} para amostras somente retificadas e amostras retificadas + lixadas ensaiadas com 5W30. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita.

4.5. EFEITO DA TEXTURIZAÇÃO NO COEFICIENTE DE ATRITO

4.5.1. Comparação das texturizadas e lixadas contra as retificadas e lixadas

4.5.1.1. Ensaios com óleo não aditivado

Os ensaios com superfície de textura TC, tem os resultados de atrito COF_{PP} mostrados na Figura 68.a. Nestes ensaios, em duas das repetições (replicas 1 e 2) o perfil de COF_{PP} tende a estabilizar a partir de 1500s entre 0,22 e 0,24. Para a réplica 3 o comportamento da curva de coeficiente de atrito é semelhante com os valores se estabilizando para tempos de aproximadamente 500s, com menor valor médio (0,18) e maior ruído. Comparados aos ensaios com superfícies lixadas, os ensaios com texturas foram menos estáveis e mostraram valor médio até 23% maiores (ensaio 1).



Figura 68 – Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies (a) de textura TC e (b) retificadas + lixadas. Ensaios com lubrificante PAO 8.

Os dados de FSA nos ensaios com textura TC são mostrados na Figura 69. Novamente, os valores de COF são mais elevados nas inversões. O perfil é semelhante aos ensaios com superfícies lixadas Figura 47, também mostrando efeito da redução dos valores de COF nas inversões (em comparação com as superfícies retificadas).



Figura 69 - Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com PAO 8. Superfície com textura TC.

Analisando os valores de COF_M nos ensaios com PAO 8 (Figura 70.a), encontramse valores de 0,15 para o ensaio 2 e 0,14 para o ensaio 3, valores estes que são maiores que os encontrados nos ensaios com superfícies lixadas, que variaram entre 0,12 e 0,13.



Figura 70 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (textura TC) e óleo lubrificante PAO 8. Superfícies com (a) textura TC e (b) lixadas. A numeração ao lado de TC é referente a réplica do ensaio. Os dados do ensaio 1 foram corrompidos, por isso não são mostrados.

Compararam-se os valores de Rpk e β s das amostras texturizadas (valores medidos entre as microcavidades) e lixadas (ver Figura 71). As amostras com textura, mesmo sendo lixadas, possuem menores raios de aspereza β s comparadas as amostras somente lixadas, com valores semelhantes as amostras somente retificadas. Da mesma forma os valores de R_{pk} são mostrados na Figura 71.b. Os corpos de prova com textura mostraram valor médio R_{pk} de 0,3µm, sendo mais elevados que as amostras lixadas (~0,2 µm) e significativamente menores que nas amostras somente retificadas, com 0,65 µm.



Figura 71 - (a) Valor do raio médio das asperezas e (b) Parâmetro funcional Rpk para amostras somente retificadas, amostras retificadas + lixadas e amostras retificadas + lixadas + texturizadas, ensaiadas com PAO 8. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita.

Como na textura TC as microcavidades estão dispersas na superfície, com recobrimento de área de 10%, talvez as dimensões das cavidades não afetem consideravelmente as condições de área de contato e a rugosidade das regiões entre as mesmas tenham efeito mais significante nos mecanismos de atrito lubrificado. Assim, as texturas TP-1 e TP-2 foram utilizadas de modo a avaliar o efeito coletivo das microcavidades.

A Figura 72.a mostra os valores de COF_{pp} em ensaios com PAO 8 e textura TP 1. Os ensaios mostraram valores médios entre as repetições com valores de 0,16 para a réplica 2 e 0,17 para as réplicas 1 e 3. A Figura 72.b mostra os resultados de COF_{pp} para os ensaios com textura TP 2 e óleo PAO 8. Os valores médios de COF_{pp} variaram entre 0,18 para a réplica 3 e 0,21 nas réplicas 1 e 2 após 1000s de ensaio.





Os dados de FSA para ambas as texturas, ensaiadas com PAO são mostrados na Figura 73, sendo (a) e (b) para textura TP 1, (c) e (d) para textura TP 2.



Figura 73 - Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de 480s (a) 480s e (b) 1680s para textura TP 1; e 480s (c) 480s e (d) 1680s para textura TP 2. Ensaios com PAO 8.

Os valores de COF são ligeiramente mais altos nos ensaios com textura TP 2 não só nas inversões, mas em todo percurso do anel. É possível ver também que as texturas não afetaram o perfil em "U" verificado nas condições anteriores nos ensaios com PAO 8.

Os valores de COF_M são mostrados na Figura 74.a para textura TP 1 e na Figura 74.b para textura TP 2. Os resultados mostram que, assim como comentado acima nos valores de COF_{PP}, a textura TP 1 tem valor médio de COF ligeiramente menor (0,12 para ensaio 3 e 0,14 para ensaio 1) ao da textura TP 2 (0,14 para ensaio 1 e 0,16 para o ensaio 3).



Figura 74 - Coeficiente de atrito em função médio do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (a) TP 1 e (b) TP 2. Óleo lubrificante PAO 8. A numeração ao lado de TP 1 e TP 2 é referente a réplica do ensaio.

Na Figura 75 mostram-se os dados de Rq para as superficies ensaiadas com PAO Figura 75. Os menores valores de Rq, das superfícies lixadas, foram os que mostraram menores valores COF_M e COF_{PP} (ver Figura 76). Em todos os ensaios com PAO 8 foram encontrados óxidos sobre a superfície, conforme mostrado na Figura 52. Os resultados dos testes com superfícies texturizadas não tiveram diferenças expressivas nos valores de coeficiente de atrito. Ao que tudo indica, a rugosidade das amostras é a que mostrou maior relação nos valores de coeficiente de atrito, tanto COF_M quanto COF_{PP}.



Figura 75 - Parâmetro de altura Rq para as amostras de ferro fundido retificadas (RT), retificadas + lixadas (LX) e , retificadas + lixadas + texturizadas com texturas TC, TP 1 e TP 2. Valores referentes as réplicas 1,2 e 3 dos ensaios com PAO 8. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita.



Figura 76 – Média dos valores de (a) COF_M e (b) COF_{PP} em função dos tipos de superfície ensaiadas. Ensaios com óleo PAO 8. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita, no caso do ensaio com textura TC somente os ensaios 2 e 3 foram computados.



Figura 77 – (a) Valor do raio médio das asperezas e (b) Parâmetro funcional Rpk para amostras somente retificadas, amostras retificadas + lixadas e amostras retificadas + lixadas + texturas TC, TP 1 e TP 2, ensaiadas com PAO 8. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita.

4.5.1.2. Ensaios com óleo aditivado

Os ensaios com 5W30 (Figura 78.a) iniciaram o deslizamento com COF_{PP} em 0,15 (média entre 100 e 200s) caindo posteriormente para valores de 0,11 no ensaio 1 e 0,13

nos ensaios 2 e 3. A queda nos valores de atrito iniciou no tempo de aproximadamente 300s os ensaios 2 e 3. Para os ensaios 2 e 3 após o tempo de 300s, alcançaram valores de COF_{PP} semelhantes aos das amostras lixadas (ver Figura 78.b), tendo em vista que os ensaios dessas amostras lixadas já começaram com este valor desde o início do ensaio.



Figura 78 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (a) TC e (b) retificadas+lixadas. Óleo lubrificante PAO 8. A numeração ao lado de TC e LX é referente a réplica do ensaio.

Nos ensaios com 5W30, os valores de COF também mostraram perfil estável ao longo dos ciclos de deslizamento (ver gráfico FSA na Figura 79). Quando se comparam os valores médios das Figura 79.a com os da Figura 79.b percebe-se que ocorreu redução do COF (FSA) com o tempo de ensaio, que foi porém bem menos acentuada comparada com ensaios em superfícies somente retificadas.



Figura 79 - Análise detalhada do sinal de atrito (FSA – Friction Signal Analysis) em um tempo de (a) 480s e (b) 1680s. Ensaios com 5W30. Textura TC

A Figura 70.a mostra os resultados de COF_M nos ensaios em superfícies com textura TC. O comportamento com o tempo foi semelhante aos de COF_{PP} , sendo, porém, que o ensaio 1 mostra valores de COF_M de até 0,1 após a formação de MoS_2 . As réplicas 2 e 3 permaneceram com valores médios de 0,12 após a ativação. As superfícies lixadas mostraram valores médios de COF consideravelmente estáveis ao longo do ensaio, em valores de 0,12.



Figura 80 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (textura TC) e óleo lubrificante 5W30. Superfícies com (a) textura TC e (b) lixadas. A numeração ao lado de TC é referente a réplica do ensaio.

Os valores do parâmetro de altura Rq são mostrados na Figura 81. Como verificado anteriormente, o parâmetro de altura Rq não possui boa relação com os valores de COF, sendo que nas amostras texturizadas, o corpo de prova com menor Rq de 0,24µm foi a que mostrou menor COF, comportamento contrário aos ensaios com superfícies somente retificadas.



Figura 81 - Parâmetros de altura Rq para as amostras de ferro fundido retificadas (RT), retificadas + lixadas (LX) e , retificadas + lixadas + texturizadas com textura TC. Valores referentes as réplicas 1,2 e 3 dos ensaios com PAO 8. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita.

Figura 81, os valores de β s e R_{pk} são comparados. As amostras com textura TC (β s entre 11-18µm) tiveram valores de β s ligeiramente acima das amostras somente retificadas (8-9µm), e consideravelmente menores que as lixadas, com valores entre 41 e 58 µm. Já nos valores de R_{pk} decresceram na ordem: superfícies retificadas, superfícies texturizadas, superfícies lixadas.



Figura 82 – (a) Valor do raio médio das asperezas e (b) Parâmetro funcional Rpk para amostras somente retificadas, amostras retificadas + lixadas e amostras retificadas + lixadas + texturizadas, ensaiadas com 5W30. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita.

Analisando a superfície de desgaste (Figura 83), percebe-se a formação de faixas deformadas (setas azuis) semelhantemente as condições anteriores. O EDS também confirma os mesmos elementos dos aditivos sobre a superfície (Figura 84).



Figura 83 – Faixa de desgaste da amostra ensaiada com óleo 5W30 TC ensaio 3.



Figura 84 – Mapa de elementos da trilha de desgaste na superfície com textura TC, ensaiada com óleo 5W30. Ensaio 3.

A figura mostra que nas faixas indicadas pelas setas, novamente elementos próprios de aditivos usados na formulação de lubrificantes automotivos, Zn, P, Ca e Mo, e que nas faixas indicadas eles estão em maior intensidade comparados a região vizinha. O espectro Raman da superfície é mostrado na Figura 85, mostrando ser igual aos espectros encontrados nas condições anteriores, com presença de MoS₂ e MoS₂+MoS_x.



Figura 85 - Espectros raman da trilha de desgaste na superfície de ferro-fundido com textura TC, ensaiada com óleo 5W30. Ensaio 1 (a) MoS₂ e (b) MoS₂+MoS_x.

O trabalho de (OLOFINJANA et al., 2015) mostrou que as texturas com microcavidades interferem na formação de um fluxo estável de tribofilme com baixo atrito, promovendo a raspagem do mesmo. Entretanto, o tipo de contato envolvido era pontual (esfera-disco) em que a área de contato é muito pequena comparada com as dimensões das microcavidades. Já os resultados deste trabalho (contato aproximadamente linear) mostram que mesmo com as microcavidades dispersas na superfície, houve formação de MoS₂ na superfície, e diferentemente das amostras lixadas, o valor de COF obteve uma redução ao longo do ensaio. Porém, os valores finais de atrito foram mais elevados em relação aos alcançados nas superfícies somente retificadas, fato este que pode relacionado a rugosidade entre as microcavidades dados os resultados.

Os ensaios com 5W30 e textura TP 1 são mostrados na Figura 86.a. Todas as repetições mostraram comportamento distinto ao longo do tempo. O ensaio 1 apresenta uma queda no valor de COF_{pp} a partir de 400s, caindo de 0,14 para 0,09 (não chegando em um regime totalmente estável). Já no ensaio 2 o decaimento de COF_{pp} começou mais rápido (200s) e o valor médio final foi mais elevado (0,12) que o ensaio 1. O ensaio 3, contudo, não mostrou o decaimento dos valores de COF_{PP}, permanecendo desde o início do ensaio em 0,14. A textura TP 2 na Figura 86.b mostra que o os valores de COF começam a cair já no início do ensaio, partindo de um valor de 0,15 para 0,1 no ensaio 1 e 0,13 nos ensaios 2 e 3.



Figura 86 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (a) TP 1 e (b) TP 2. Óleo lubrificante 5W30. A numeração ao lado de TP 1 e TR 2 é referente a réplica do ensaio.

Pela Figura 87, assim como na textura TC, alguns ensaios mostraram redução nos valores de COF nos dois sentidos de deslizamento (ensaios 1 em ambas texturas) e outros em apenas 1 sentido. Como consequência disso, o valor médio de atrito nos ensaios que mostraram redução em apenas um sentido, foram mais elevados.



(c) Figura 87 - Análise detalhada do sinal de atrito (FSA Priction Signal Analysis) em um tempo de 480s (a) 480s e (b) 1680s para textura TP 1; e 480s (c) 480s e (d) 1680s para textura TP 2. Ensaios com 5W30.

Como em todas as condições anteriores de ensaios com 5W30, os valores de COF_M tem comportamento bastante semelhante ao COF_{PP}, diferenciando apenas no valor, que em todos os casos é menor. Os valores de COF_M são mostrados na Figura 88.



Figura 88 - Coeficiente de atrito em função médio do tempo para os ensaios com superfícies texturizadas (a) TP 1 e (b) TP 2. Óleo lubrificante 5W30. A numeração ao lado de TP 1 e TP 2 é referente a réplica do ensaio.

Como já tem sido discutido acima, os valores de Rq da Figura 89.b não mostraram relação com o COF, uma vez que no contato ocorre formação de MoS₂ que por sua vez depende mais especificamente da rugosidade na ponta das asperezas, que neste caso é aqui representada pelo parâmetro funcional R_{pk} e pelo parâmetro de Greenwood & Willianson (G&W) βs. Os valores de R_{pk} e βs são mostrados na Figura 90.



Figura 89 - Parâmetros de altura Rq para as amostras de ferro fundido retificadas (RT), retificadas + lixadas (LX) e , retificadas + lixadas + texturizadas com texturas TC, TP 1 e TP 2. Valores referentes as réplicas 1,2 e 3 dos ensaios com 5W30. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita.



Figura 90 – (a) Valor do raio médio das asperezas e (b) Parâmetro funcional Rpk para amostras somente retificadas, amostras retificadas + lixadas e amostras retificadas + lixadas + texturas TC, TP 1 e TP 2, ensaiadas com 5W30. As três colunas representam as réplicas does ensaios, em ordem crescente da esquerda para a direita.

Para maior clareza, os parâmetros β s e R_{pk} foram colocados de forma conjunta no gráfico da Figura 91. Neste gráfico os valores médios de COF_M (média a partir dos três últimos pontos) são confrontados com a razão dos parâmetros β s/R_{pk}. Notam-se três diferentes regiões entre os pontos do gráfico, sendo:

 Região I, na qual se enquadram as superfícies somente retificadas, que mostraram menores valores de βs e maiores valores de R_{pk}. Lembrando que as superfícies retificadas mostraram menores valores de COF ao final do ensaio.

- Região II é composta dos ensaios com superfícies texturizadas. Em todos os casos desta região, ao longo do ensaio houve queda nos valores de atrito, sendo, porém, mais elevados que os da superfície somente retificadas (ou amostras da região 1).
- Região III é composta das amostras lixadas e a terceira réplica dos ensaios com textura TP 1. Os níveis de COF são semelhantes a alguns ensaios da região II, não apresentando, porém, a queda de COF ao longo do ensaio.

Ao que tudo indica, as texturas não estão empregando um efeito significativo sobre os valores de COF, mas sim, a rugosidade entre as microcavidades, que em virtude do processo de lixamento, tem a topografia alterada, com maiores raios e menores alturas das asperezas. Estas alterações de rugosidade, ou as diferentes regiões encontradas na Figura 91, podem estar relacionadas com a proporção de MoSx e MoS2, que corroboram com o modelo proposto por (KHAEMBA; NEVILLE; MORINA, 2016). É importante ressaltar que todas estas hipóteses levantadas neste trabalho são aplicadas quando o deslizamento ocorre contra o sentido das marcas de usinagem, uma vez que o estado de tensões no contato é bastante alterado quando o deslizamento ocorre no mesmo sentido (ACERO, 2015).



Figura 91 – Relação dos valores de COF_M com a razão dos parâmetros de rugosidade $\beta s/R_{pk}$.

5 CONCLUSÕES

Ensaios de movimento alternativo objetivando comparar eficiência energética entre óleos, materiais, filmes finos ou texturas, devem ser analisados pela ótica conjunta dos gráficos de FSA, e COF_{PP}. Os valores de FSA fornecem o comportamento do COF ao longo do de cada curso do anel, indicando se o mesmo tem valores mais elevados na inversão (perfil em "U") ou se permanecem constantes. Caso o comportamento seja o perfil em "U" com valores mais elevados na inversão, é necessário obter um coeficiente de atrito médio, para assim ter-se um comportamento mais aproximado da influência das entradas do sistema sobre os valores de COF. Com isso, recomenda-se além dos valores de COF_{PP}, uma análise ou pela média do perfil ou pelo trabalho, por meio dos dados de FSA.

Os ensaios com óleo base PAO 8 mostram que, em regime limítrofe de lubrificação, o comportamento do coeficiente médio de atrito apresenta pouca variação entre os tipos de superfícies testadas, sendo mais sensível a altura média das asperezas (representada por Rq). Mesmo superfícies texturizadas não foram sensíveis as variações de espaçamento entre microcavidades, apresentando valores semelhantes. Já o COF nas inversões ou COF_{PP} foi mais sensível aos valores de β_s e R_{pk}, mostrando menores valores para as superfícies lixadas e maiores valores para as superfícies somente retificadas. Em todas as condições de ensaio com PAO 8, na superfície de deslizamento formaram-se Fe₂O₃ e Fe₂O₄.

Os ensaios com óleo totalmente formulado SAE 5W-30 mostraram que os valores de COF no final do ensaio dependem fortemente das características do pico das asperezas (aqui representada po β_s e R_{pk}) e tem pouca relação coma altura média (parâmetro Rq). Foram observados nos tribofilmes formados: MoS₂ e MoS2+MoSx, e acredita-se que dependendo da dos valores de β_s e R_{pk} a proporção de MoS_x+MoS_x pode ser menor ou maior, governando o valor de COF no deslizamento. Ao que tudo indica, as microcavidades nas distribuições e dimensões utilizadas neste trabalho, não tiveram efeito significativo no valor de COF, sendo a topografia entre as mesmas a maior contribuinte para alcançar o menor atrito, o que culmina que o processo de retirada das rebarbas formadas na ablação deve ser cuidadosamente estudado quando intuito do estudo for coeficiente de atrito com formação de tribofilme.

REFERÊNCIAS

ACERO, J. S. R. **Influência do acabamento superficial no desempenho de lubrificantes de motor novos e usados em automóveis abastecidos com E22 e E100.** [s.l.] Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2015.

ASME HANDBOOK, V. 18. Friction, Lubrication an Wear Technology. [s.l: s.n.]. v. 2

BHUSHAN, B. Biomimetics: lessons from nature-an overview. **Philosophical Transactions** of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 367, n. 1893, p. 1445–1486, 2009.

BISSON, E. E. et al. Friction, wear, and surface damage of metals as affected by solid surface films. **NACA Report**, p. 91–111, 1956.

BJÖRLING, M. Friction in elasto-hydrodynamic lubrication. [s.l.] Luleå University of Technology, 2014.

BLAU, P. J. Friction Science and Technology: From Concepts to Applications. [s.l: s.n.].

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The Friction and Lubrication of Solids**. London: Oxford University Press, 1950.

COUSSEAU, T.; RUIZ ACERO, J. S.; SINATORA, A. Tribological response of fresh and used engine oils: The effect of surface texturing, roughness and fuel type. **Tribology International**, v. 100, p. 60–69, 2016.

DE OLIVEIRA TEIXEIRA, P. H.; REIS, A. G. DOS; JANSSEN, A. Effect of Solid-State Laser Parameters on the Surface's Topography Formation During Texturization of Hard Metal Cutting Tools. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 7, n. 1, p. 63–69, 2015.

ETSION, I. Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication. **Friction**, v. 1, n. 3, p. 195–209, 2013.

ETSION, I.; BURSTEIN, L. A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure. **Tribology Transactions**, v. 39, n. 3, p. 677–683, 1996.

GRAHAM, J.; SPIKES, H.; KORCEK, S. The Friction Reducing Properties of Molybdenum Dialkyldithiocarbamate Additives: Part I — Factors Influencing Friction Reduction. **Tribology Transactions**, v. 44, n. March 2015, p. 626–636, 2001.

GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. B. P. Contact of Nominally Flat Surfaces. **Proceedings** of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 295, n. 1442, p. 300–319, 1966.

GROPPER, D.; WANG, L.; HARVEY, T. J. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings. **Tribology International**, v. 94, p. 509–529, 2016.

HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R. Fundamentals of Fluid Film Lubrication Second Edition. [s.l: s.n.].

HUTCHINGS, I. M. tribology-hutchings.pdf. 1. ed. London: Butterworth Heinemann, 1992.

JENG, Y.-R. Impact of Plateaued Surfaces on Tribological PerformanceTribology Transactions, 1996.

KHAEMBA, D. N.; NEVILLE, A.; MORINA, A. A methodology for Raman characterisation of MoDTC tribofilms and its application in investigating the influence of surface chemistry on friction performance of MoDTC lubricants. **Tribology Letters**, v. 59, n. 3, p. 1–17, 2015.

KHAEMBA, D. N.; NEVILLE, A.; MORINA, A. New insights on the decomposition mechanism of Molybdenum DialkyldiThioCarbamate (MoDTC): a Raman spectroscopic study. **RSC Adv.**, v. 6, n. 45, p. 38637–38646, 2016.

KLIGERMAN, Y.; ETSION, I.; SHINKARENKO, A. Improving Tribological Performance of Piston Rings by Partial Surface Texturing. **Journal of Tribology**, v. 127, n. 3, p. 632, 2005.

KOSARIEH, S. et al. The effect of MoDTC-type friction modifier on the wear performance of a hydrogenated DLC coating. **Wear**, v. 302, n. 1–2, p. 890–898, 2013.

LEITE, M. V. **Conformação Mecânica : Efeito Da Topografia Na Transferência De Material E No Atrito**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2010.

LI, K. et al. Friction and wear performance of laser peen textured surface under starved lubrication. **Tribology International**, v. 77, p. 97–105, 2014.

MAHROVA, M. et al. Critical insight into mechanochemical and thermal degradation of imidazolium-based ionic liquids with alkyl and monomethoxypoly(ethylene glycol) side chains. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 118, n. 39, p. 22544–22552, 2014.

MARINHO, A. M. G. Wear and Friction Torque in thrust ball and roller bearings lubricated with "Windmill Gear Oils". [s.l.] Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, 2011.

MORINA, A. et al. ZDDP and MoDTC interactions and their effect on tribological performance - Tribofilm characteristics and its evolution. **Tribology Letters**, v. 24, n. 3, p. 243–256, 2006a.

MORINA, A. et al. ZDDP and MoDTC interactions in boundary lubrication-The effect of temperature and ZDDP/MoDTC ratio. **Tribology International**, v. 39, n. 12, p. 1545–1557, 2006b.

OBARA, R. B.; FARIA, J. O. M. G. DE; SINATORA, A. The effect of oxide and tribofilm formation on the wear of cylinder bores from flex - fuel engines. p. 1–7, 2016.

OLOFINJANA, B. et al. Effect of laser surface texturing (LST) on tribochemical films dynamics and friction and wear performance. **Wear**, v. 332–333, p. 1225–1230, 2015.

ONODERA, T. et al. Development of a quantum chemical molecular dynamics tribochemical simulator and its application to tribochemical reaction dynamics of lubricant additives. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, v. 18, n. 3, p. 34009, 2010.

PATEL, D.; JAIN, V. K.; RAMKUMAR, J. Micro texturing on metallic surfaces : State of the art. 2016.

PETTERSSON, U.; JACOBSON, S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts. **Tribology International**, v. 36, n. 11, p. 857–864, 2003.

PROFITO, F. J. **Modelagem Unidimensional Do Regime Misto De Lubrificação Aplicada a Superfícies Texturizadas**. [s.l.] Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2010.

ROVANI, A. C. **ESTUDO DA TRANSIÇÃO DO REGIME DE DESGASTE MODERADO PARA O DESGASTE SEVERO A SECO E SOB O REGIME DE LUBRIFICAÇÃO LIMÍTROFE**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.

RYK, G. et al. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components. **Tribology Transactions**, v. 45, p. 444–449, 2002.

SAHOO, S. et al. Temperature-dependent Raman studies and thermal conductivity of fewlayer MoS2. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 117, n. 17, p. 9042–9047, 2013.

SEABRA, J.; STTOMAYOR, A. Lubrificação elastohidrodinâmica. 1. ed. Porto: Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, 2002.

SINATORA, A. Tribologia : Um resgate histórico. [s.l: s.n.].

SPIKES, H. Friction Modifier Additives. Tribology Letters, v. 60, n. 1, p. 1–26, 2015.

STEHLE, R. C. et al. Oxidation reaction kinetics for the steam-iron process in support of hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 23, p. 15125–15135, 2011.

SUDEEP, U.; TANDON, N.; PANDEY, R. K. Performance of Lubricated Rolling/Sliding Concentrated Contacts With Surface Textures: A Review. **Journal of Tribology**, v. 137, n. 3, p. 31501, 2015.

TANG, Z.; LI, S. A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007-present). **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v. 18, n. 3, p. 119–139, 2014.

TRINDADE, E. D. **Efeito do tipo de óleo básico no desempenho tribológico de dialquilditiocarbamato de molibdênio com aditivo para lubrificantes automotivos**. [s.l.] Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2014.

VENGUDUSAMY, B. et al. Behaviour of MoDTC in DLC/DLC and DLC/steel contacts. **Tribology International**, v. 54, p. 68–76, 2012.

VIÁFARA, C. C. **Transição no regime de desgaste por deslizamento dos aços: uma abordagem termodinâmica.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2010.

ZHANG, S. M. H. AND Y. J. AND D. H. AND H. Friction reduction using discrete surface textures: principle and design. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 47, n. 33, p. 335307,

2014.

ASTM D6425 - Standard Test Method for Measuring Friction and Wear Properties of Extreme Pressure (EP) Lubricating Oils Using SRV Test Machine.

ISO/TC 28/SCN 2471 Testing of lubricants – Tribological tests in the translatory oscillation apparatus – Determination of tribological quantities for oils and greases in the translatory oscillation apparatus, emissão para comentários.