

PROPOSTA DE METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA O COEFICIENTE DE ATRITO EM ENSAIOS DO TIPO ANEL SOBRE CILINDRO

João Luiz do Vale, joaovale@utfpr.edu.br¹

Carlos Henrique da Silva, carloshs@utfpr.edu.br²

Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br²

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Londrina.

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Av. dos Pioneiros, 3131. Londrina – Paraná – Brasil
CEP 86036-370

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba.

Resumo: Ensaios tipos oscilatórios (*reciprocating*) são comumente aplicados para estudos tribológicos, por exemplo em avaliação de revestimentos e para o par tribológico anel - cilindro. Contudo, este tipo de ensaio é suscetível a problemas de vibração (por auto excitação), rigidez do sistema, presença de suspensões para fixação dos corpos de prova, entre outros fatores. Acrescenta-se, ainda, a maior dificuldade para processamento e apresentação dos resultados. Este artigo propõe um novo parâmetro de coeficiente de atrito (COF) para um semi-ciclo calculado através de avaliações de energia dissipada e uma nova metodologia para tratamento dos dados de COF instantâneo. Este último procedimento consiste em aplicar um filtro passa baixa (por Fourier) com posterior aproximação do COF por polinômios de 3ª ordem. Ambas as metodologias foram aplicadas em um estudo de caso: ensaio *reciprocating* tipo anel sobre cilindro. Os corpos e contra-corpos foram, respectivamente: ferro fundido vermicular (FFV), retirado de um bloco de motor de combustão interna (MCI), e anel de segmento (tipo de compressão) de aço inoxidável nitretado com perfil assimétrico. Os ensaios foram realizados imersos em óleo SAE 30 CF monoviscoso com pouca carga de aditivos. A temperatura do banho foi controlada e mantida a 40 °C. Verificou-se que COF energético apresentou menor dispersão de resultados, quando apresentado em curvas de Stribeck-like, em comparação com o COF médio; o qual é amplamente utilizado na literatura. A metodologia de aproximação polinomial retirou as vibrações espúrias do sinal e se mostrou coerente com a teoria de lubrificação hidrodinâmica. Por fim, estudos de triboscopia, utilizando a metodologia de aproximação polinomial se mostraram relevantes para avaliação do COF instantâneo durante o semi-ciclo. Com isso, pôde-se observar comportamento assimétrico do COF instantâneo em relação a pista de deslizamento e redução de seu valor com a diminuição da carga normal aplicada. Ademais, observaram-se condições favoráveis e não favoráveis, por hipótese, para a formação de filme de óleo através da avaliação do comportamento do COF instantâneo ao longo da pista.

Palavras-chave: Coeficiente de atrito; Ensaio *reciprocating*; Processamento de sinais; Curvas de Stribeck-like; Triboscopia.

1. INTRODUÇÃO

Encontram-se na literatura muitos trabalhos que estudam a influência da texturização e de diferentes características topográficas das superfícies brunidas no coeficiente de atrito cinético (COF) e no desgaste. Citam-se os trabalhos de: Galda *et al.* (2009) e Grabon *et al.* (2013) que estudaram o efeito de *dimples*; Tomanik (2008) que avaliou a influência de texturas a laser e diferentes acabamentos da superfície brunida; Johansson *et al.* (2011) que investigaram a relação do coeficiente de atrito com parâmetros de rugosidade; Guermat *et al.* (2011) que caracterizaram vários revestimentos para cilindros em termos de coeficiente de atrito e desgaste em ensaios de anel sobre cilindro; entre outros. Ainda muitos estudos são orientados para avaliação dos efeitos das características do óleo lubrificante. Citam-se: Lenauer *et al.* (2015) que avaliaram a formação de tribofilmes com lubrificantes alterados artificialmente; Profito *et al.* (2013) que estudaram alterações de viscosidade e inclusão de aditivos em óleos lubrificantes.

Todos estes trabalhos foram realizados avaliando resultados obtidos com ensaio tipo *reciprocating*. Contudo, abordagens sistemáticas para tratamentos de resultados deste tipo de ensaio são escassas na literatura. Este ensaio, em especial, tem vibração auto-excitada pelo próprio contato e pelo movimento durante os testes; e seu resultado é sujeito a influência da rigidez do aparato, sistemas de amortecimento do equipamento e de suspensão para a fixação dos corpos de prova. Por exemplo, Dimkovski *et al.* (2009) apontaram a presença de ruídos e variações nos resultados de COF, para este tipo de ensaio, em montagens com e sem suspensão, dependendo das condições impostas nos ensaios.

O resultado de COF nestes ensaios oscilatórios com óleo lubrificante é dominado por fenômenos de lubrificação hidrodinâmica. Neste tipo de lubrificação as superfícies são separadas por uma camada fina de óleo, e o carregamento normal é suportado pela pressão do filme. Para tanto, as superfícies devem ter contato conforme e velocidade relativa suficiente grande (Stachowiak e Batchelor, 2005).

Este artigo tem objetivo de apresentar duas propostas para o tratamento de resultados de COF retirados de ensaios tipo reciprocating de anel sobre cilindro. A primeira proposta é de um parâmetro para avaliação do coeficiente de atrito cinético dentro de um semi-ciclo (um dos dois sentidos de movimento). A outra proposta é de uma metodologia para tratamento dos resultados de COF instantâneo que permita uma avaliação triboscópica. Estas técnicas são aplicadas em um estudo de caso e comparadas com metodologias encontradas na literatura para ampliar a discussão.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

As amostras do cilindro foram retiradas de blocos de motor de combustão interna (MCI), modelo Ford Griffin V8, com cilindros de Ø83 mm. A Figura 1(a) apresenta uma fotografia do bloco. Estes blocos, providos pela empresa Tupy S.A., foram fabricados com ferro fundido vermicular (FFV), da classe GJV450 (norma ISO 16112). O acabamento dos cilindros foi realizado por processo de brunimento, realizado em brunidora vertical modelo V810 - Nagel. Utilizou-se ferramentas de diamante – D151 e D15 para desbaste e acabamento, respectivamente. A velocidade de avanço e rotação do processo foram 12,4 m/min e 130 rpm, respectivamente. Para a realização dos ensaios tribológicos foram retiradas amostras, conforme Figura 1(b), com largura de 25 mm e comprimento de 36 mm.

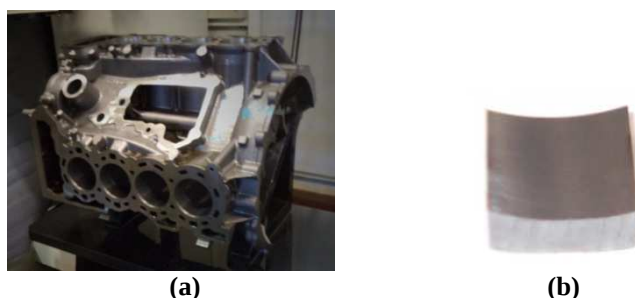


Figura 1. Fotografia do corpo de prova: (a) Bloco de motor (b) Amostra retirada do cilindro.

Avaliou-se neste trabalho um modelo comercial de anel de segmento, o qual foi provido pela empresa Metal Leve S.A. A Figura 2 apresenta uma fotografia do anel e o detalhe da amostra preparada para o ensaio. O anel especificado é de aço inoxidável – com tratamento de nitretação na face de trabalho – com espessura de 1,2 mm e diâmetro nominal de 83 mm, compatível com os cilindros. O anel é do tipo de compressão, torsional positivo e com face abaulada assimétrica (Mahle metal leve, 2017). Os anéis assimétricos, em especial, têm montagem no pistão indicada pelo fabricante. Deste modo, um lado do anel sempre será associado a determinado sentido de movimento do pistão. Neste trabalho, apresentou-se os dados referentes ao sentido de subida do anel. O lubrificante utilizado para os ensaios foi o Petronas Urania SAE 30 API CF. Este óleo é monovisco e com pouca carga de aditivos.



Figura 2. Fotografia do contra-corpo de prova: (a) Segmento de anel (b) Amostra para ensaio.

2.2. Aparato

Os ensaios tribológicos foram realizados em aparato, apresentado na Figura 3, disponível no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da UTFPR. O modelo do equipamento é o CETR-UMT - Bruker. Utilizou-se a base para movimento reciprocating e a suspensão superior, conforme recomendação contida no manual do fabricante (CETR-UMT, 2010). Para a realização dos ensaios foi necessário a construção de um dispositivo de fixação, o qual é

constituído de: porta-anel, cuba para óleo com porta-cilindro, sistema de controle para aquecimento do óleo e sistema de monitoramento da temperatura do óleo.

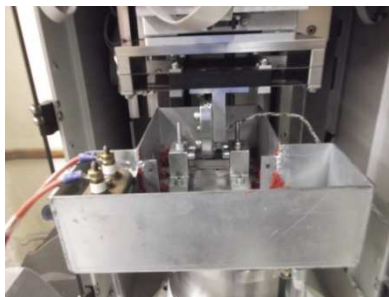


Figura 3. Fotografia do aparato, e dispositivo de fixação, utilizados para os ensaios tribológicos.

A taxa de aquisição utilizada foi de 1 kHz. Deste modo, o período de aquisição, Δt [s], foi de 0,001 s. Foram aquisitadas as seguintes variáveis: tempo (t [s]), força normal aplicada (F_N [N]), força de atrito (F_{at} [N]) e a posição dentro da pista de deslizamento (x [mm]). O coeficiente de atrito cinético (COF[-]) foi calculado pelo modelo de Da Vinci (Blau, 1996), conforme Equação (1).

$$COF = \frac{F_{at}}{F_N} \quad (1)$$

2.3. Planejamento dos ensaios

Os ensaios tribológicos foram realizados imersos em óleo mantido a temperatura de $40 (\pm 3) ^\circ\text{C}$. Os ensaios tiveram duração de 65 s, e os resultados apresentados foram referentes aos últimos 5 semi-ciclos.

Duas baterias de ensaios foram realizadas. A primeira fez uma varredura de parâmetros de frequência de movimento, força normal e comprimento de pista. As condições de ensaio, em um total de 120 [6 frequências x 5 forças normais x 4 comprimentos de pista (CP)], são apresentadas na Tabela 1. Neste planejamento realizaram-se 3 repetições. A segunda bateria, com planejamento apresentado na Tabela 2, teve intuito de avaliar o comportamento do COF em função da posição dentro da pista em avaliações de triboscopia. Para a 2ª bateria foram realizados 16 condições e 5 repetições.

Tabela 1. Planejamento dos ensaios da 1ª bateria.

Parâmetros	Lista de condições					
Frequência [Hz]	1	2,5	5	7,5	10	12,5
Força normal [N]	25	50	75	100	125	
CP [mm]	3	5	7,5	10		
Repetições [-]	3					

Tabela 2. Planejamento dos ensaios da 2ª bateria.

Parâmetros	Valores															
Condição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Força normal [N]	25	50	75	100	25	50	75	100	25	50	75	100	25	50	75	100
Frequência [Hz]	0,05				1				2,5				5			
CP [mm]									10							
Repetições [-]	5															

2.4. Processamento de sinais

O processamento dos sinais e as avaliações de resultados de ensaios tipo reciprocating não são triviais. Esta seção apresenta as metodologias para determinação dos parâmetros de avaliação de semi-ciclos e para análises de triboscopia (Santos *et al.*, 2015).

Inicialmente, a velocidade instantânea, V [mm/s], foi obtida com a derivada central, da posição da base do reciprocating em relação ao tempo. Em seguida, os dados do ensaio foram divididos em ciclos completos de movimento, através da verificação de inversão de velocidade. Cada ciclo completo, por sua vez, foi subdividido em dois semi-ciclos. A Figura 4 mostra um exemplo de um ensaio com a separação proposta. Neste exemplo, os dados foram retirados do primeiro ciclo completo após 60 segundos de um ensaio da condição 9 apresentado na Tabela 2. Acrescenta-se que o 1º e o 2º semi-ciclos são relacionados aos semi-ciclos dos sentidos de subida e de descida do anel do pistão, respectivamente.

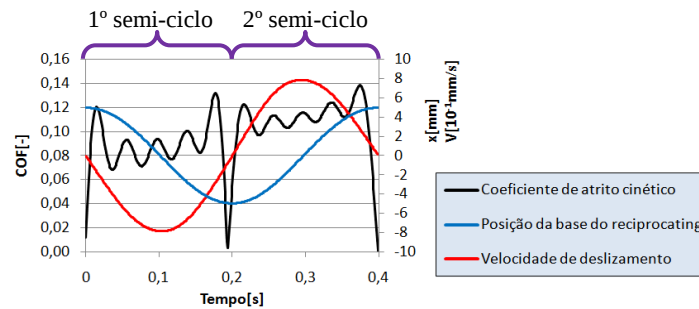


Figura 4. Exemplo de separação dos dados de um ciclo em semi-ciclos (CP= 10 mm, $F_N=25$ N e $f= 2,5$ Hz).

Com os semi-ciclos divididos, calculou-se o coeficiente de atrito cinético médio (COFm) para cada semi-ciclo. O COFe, por sua vez, é obtido com duas padronizações da energia do semi-ciclo, com o intuito de torná-la adimensional. A energia total dissipada devido ao atrito cinético para um semi-ciclo, E_t [Nmm], dada na Equação (2), é o somatório dos produtos da força de atrito e do deslocamento, Δx [mm].

$$E_t = \sum F_{at} \Delta x \quad (2)$$

As padronizações impostas à energia são obtidas dividindo-se a força de atrito, da Equação (2), pela força normal; e todo o termo pelo somatório de deslocamentos. O resultado é mostrado na Equação (3). Verifica-se que a razão das forças pode ser substituída pelo coeficiente de atrito cinético instantâneo; e o somatório dos deslocamento corresponde ao comprimento de pista, CP [mm]. Desta forma, o termo é adimensional e associado ao coeficiente de atrito energético, calculado através da padronização da energia do semi-ciclo.

$$COFe = \frac{\sum \frac{F_{at}}{F_N} \Delta x}{\sum \Delta x} = \frac{\sum COF \Delta x}{CP} \quad (3)$$

O parâmetro COFe apresenta uma grande vantagem, em relação ao COFm, pois é calculado através de uma média ponderada em relação ao deslocamento. Deste modo, grandes perturbações que ocorrem comumente nas reversões do movimento têm menor peso neste parâmetro. Diferenças mais significativas, entre COFe e COFm, foram observadas em condições de ensaio que impuseram maiores acelerações nas reversões, com consequente maior perturbação dos dados do coeficiente de atrito. Acrescenta-se, contudo, que a aplicação deste parâmetro deve ser avaliado para cada tipo de tribômetro. Para o aparato utilizado neste trabalho, com acionamento tipo biela-manivela, verifica-se que há variação do deslocamento com a posição da base do reciprocating.

Para as curvas de Stribeck-like, o parâmetro de Stribeck (Str) foi adaptado para o ensaio, e ao contrário do proposto em alguns artigos da literatura, foi relacionado com a velocidade de deslizamento. Esta adaptação permite a comparação de ensaios com diferentes condições de frequência e comprimentos de pista. Assim, o Stribeck máximo do semi-ciclo foi obtido com a Equação (4). A pressão média do contato ($P_{média}$) foi determinada através de análises de elementos finitos; detalhes podem ser encontrados em Vale (2016).

$$Str_{max} = \frac{\eta V_{max}}{P_{média}} \quad (4)$$

A metodologia de aproximação polinomial, de terceira ordem, consiste basicamente em duas etapas. Inicialmente é aplicado um filtro passa-baixa com frequência de corte de dez vezes a frequência do ensaio tribológico para os dados de COF. Em seguida, aproxima-se uma equação polinomial de 3ª ordem com a desconsideração dos dados de início e fim do semi-ciclo.

3. Resultados e discussão

3.1. Coeficiente de atrito médio e energético

O resultado de COFm e COFe, para os ensaios da 1ª bateria, são apresentados na Figura 5 em curvas de Stribeck-like. Uma linha de tendência polinomial de segunda ordem foi acrescida em ambos os casos. Verificou-se que de modo geral os valores apresentaram maior diferença para condições de ensaio que impuseram maiores acelerações nas reversões do movimento (maiores frequências e forças normais).

Entende-se que o COFe apresenta melhor concordância com a curva de Stribeck-like, porque a ponderação do COF instantâneo pelo deslocamento, conforme Equação (3), faz com que pontos iniciais e finais do semi-ciclo tenham menor peso que pontos da parte central da pista; já para o COFm todos os resultados têm igual peso.

Chama-se a atenção, ainda, que estes pontos iniciais e finais estão associados a valores de menor velocidade de deslizamento, e alta aceleração. Contudo, esses pontos apresentam valores de COF instantâneos muito pequenos e que não traduzem o comportamento físico desta grandeza de modo compatível com a teoria de lubrificação hidrodinâmica. Enfatiza-se que conforme esta teoria, menores valores de COF instantâneos estariam associados a maiores velocidades e a tendência de formação de filmes.

Observa-se nos resultados da Figura 5 que algumas condições resultam em pontos fora da curva, em ambas as avaliações. Três pontos, com menor valor de COFe foram destacados na Figura 5(b) e suas condições de ensaio são detalhados na Tabela 3. Nota-se, que as condições dos pontos são relacionadas ao maior comprimento de pista e aos dois menores valores de força normal. Entende-se, que valores com maior velocidade de deslizamento e menores forças normais apresentem valor reduzido de COFe. Contudo, estes pontos fora da curva (ainda que com condições favoráveis para a formação do filme), apresentam valores de COFe muito menores do que a tendência mostrada pela curva de Stribeck-like. A hipótese para este comportamento é uma questão dinâmica associada ao ensaio. Deve-se atentar que as condições durante um semi-ciclo não são de quase-equilíbrio. Ou seja, cada velocidade de deslizamento acontece de modo instantâneo, obedecendo a aceleração e desaceleração que acontece durante o semi-ciclo. As constatações anteriores são melhor avaliadas e discutidas na seção 3.3 onde resultados da 2ª bateria são apresentados e avaliações triboscópicas são conduzidas.

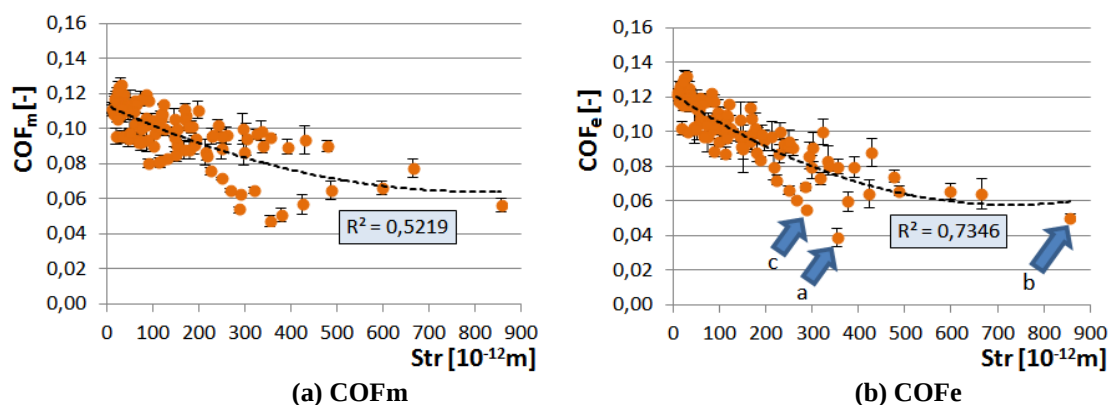


Figura 5. Curvas de Stribeck-like.

Tabela 3. COFe, e as condições de ensaio, para os pontos indicados na Figura 5.

Variáveis	Ponto a	Ponto b	Ponto c
COFe [-]	0,039 ± 0,006	0,055 ± 0,002	0,051 ± 0,002
Comprimento de pista [mm]	10	10	10
Força normal [N]	50	25	75
Frequência [Hz]	7,5	12,5	7,5

3.2. Avaliação da metodologia de aproximação polinomial para o COF

Para a avaliação da metodologia de aproximação polinomial foi utilizado resultados de COF instantâneo de um semi-ciclo da 1ª bateria, os quais são apresentado na Figura 6(a). Observa-se que alguns pontos coletados chegam a ter valores negativos devido à vibração e ruídos no sinal. Contudo, entende-se que como o deslizamento no ensaio é continuo valores de COF negativos (associado a forças tangenciais de atrito na direção do movimento) não fazem sentido físico. Sendo assim, considerações do processo de filtragem devem ser discutidas e exploradas para esse tipo de ensaio.

A Figura 6(a) também apresenta o resultado da aplicação da filtragem por Fourier e da aproximação polinomial. Nota-se que a filtragem por Fourier reduz o ruído do sinal, mas não elimina totalmente a ondulação. Testes foram realizados com várias frequências de corte, mas não houve melhora no resultado desta etapa. Tentativas também foram realizadas com filtro passa faixa com valores centrados na frequência do ensaio, mas não se obteve resultados satisfatórios. Após a aplicação do filtro passa baixa, realizou-se a aproximação polinomial de 3ª ordem e com essa etapa, obteve-se a eliminação das ondulações.

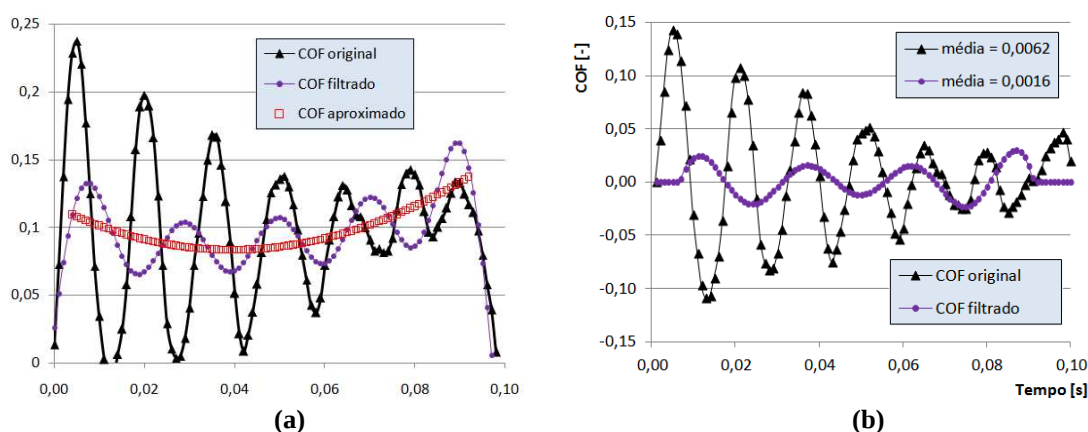


Figura 6. Exemplo de COF instantâneo, filtrado e a aproximação polinomial de terceira ordem para condição de CP=10 mm, f=5 Hz e FN=50 N: (a) Sinal original, filtrado e aproximação polinomial (b) Diferenças entre COF instantâneo e filtrado com a aproximação polinomial.

Com o intuito de avaliar a metodologia de aproximação polinomial, apresenta-se na Figura 6(b), duas curvas que foram obtidas pelas diferenças entre os resultados de COF instantâneo 'original e filtrado' e 'original e aproximação polinomial'. Verifica-se que ambas as curvas oscilam em torno do eixo horizontal, com valores médios muito pequenos, 0,0062 e 0,0016, respectivamente. Isso comprova que o resultado da aproximação polinomial reduziu a ondulação, mantendo excelente representatividade da tendência original do COF instantâneo. Enfatiza-se, que o comportamento desta ondulação, apresentada na Figura 6(b), pode ser associada a um sistema vibratório com amortecimento e com redução da amplitude de oscilação no tempo (Rao, 2005). Entende-se que esse comportamento é intrínseco à montagem do ensaio apresentada, com presença de suspensão na fixação das peças e vibração auto-excitada devido ao movimento oscilatório.

O resultado da aproximação polinomial está consonante com a teoria hidrodinâmica, já que observa-se o COF máximo relativamente mais próximo do início do semi-ciclo e a sua redução até a parte central da pista. Assim, a aproximação polinomial traz uma avaliação com melhor interpretação física dos fenômenos envolvidos. Por fim, apresenta-se na Figura 7 uma comparação quantitativa para verificar variações médias nos resultados das metodologias. Verifica-se que com a aplicação das metodologias há redução dos valores dos desvios-padrão. Ressalta-se, ainda, que o resultado para os valores médios apresentam semelhança estatística, muito embora, constata-se uma relativa redução para a média móvel.

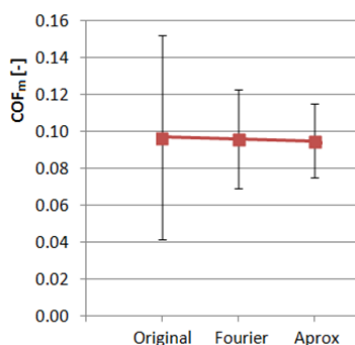


Figura 7. Comparação quantitativa entre média móvel, filtragem por Fourier e aproximação polinomial.

3.3. Avaliação de triboscopia

Devido a verificação de pontos fora da curva, evidenciados no resultado da 1ª bateria (vide Figura 5(b)), planejou-se um ensaio com condições favoráveis, e não favoráveis, para a formação de filme. A Figura 8 mostra a velocidade de deslizamento teórica, em função da posição dentro da pista e do logaritmo do tempo de ensaio, para um ciclo completo de todas as frequências. Enfatiza-se a grande diferença no perfil de velocidade para estas condições. Segundo a teoria hidrodinâmica, a formação de filmes seria favorecida para maiores velocidade de deslizamento associado ao efeito de cunha (Ludema, 1996).

Nestes resultados aplicou-se a aproximação polinomial, discutida na seção anterior, e apresentado na Figura 9. Este resultado demonstra, de modo característico a aplicação desta metodologia, pois faz a avaliação de todas as frequências ensaiadas. Os resultados foram retirados, de uma repetição do primeiro semi-ciclo após 60 segundos. Verifica-se que

para esta bateria de ensaios a metodologia foi eficaz para todas as condições e com boa representatividade dos resultados de COF instantâneo. Contudo, chama-se a atenção que a metodologia apresenta limitações para frequências acima de 15 Hz.

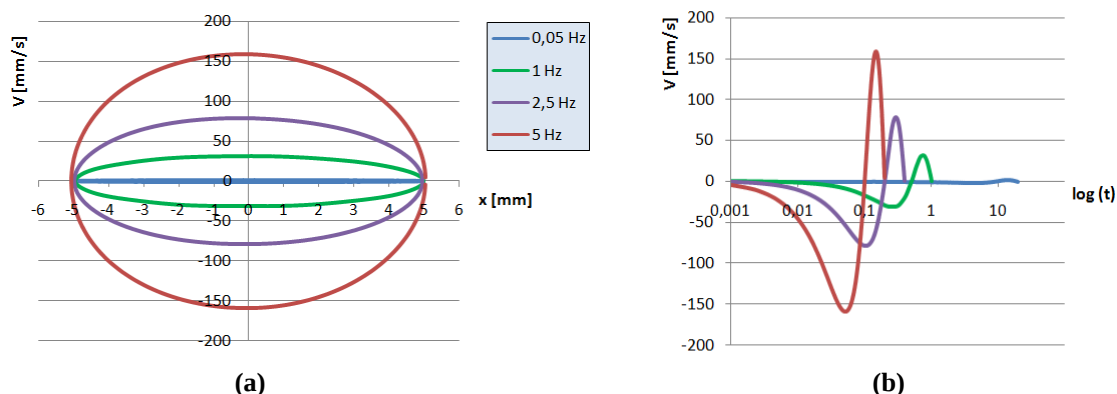


Figura 8. Velocidade de deslizamento em: (a) Função da posição dentro da pista (b) Função do logaritmo do tempo.

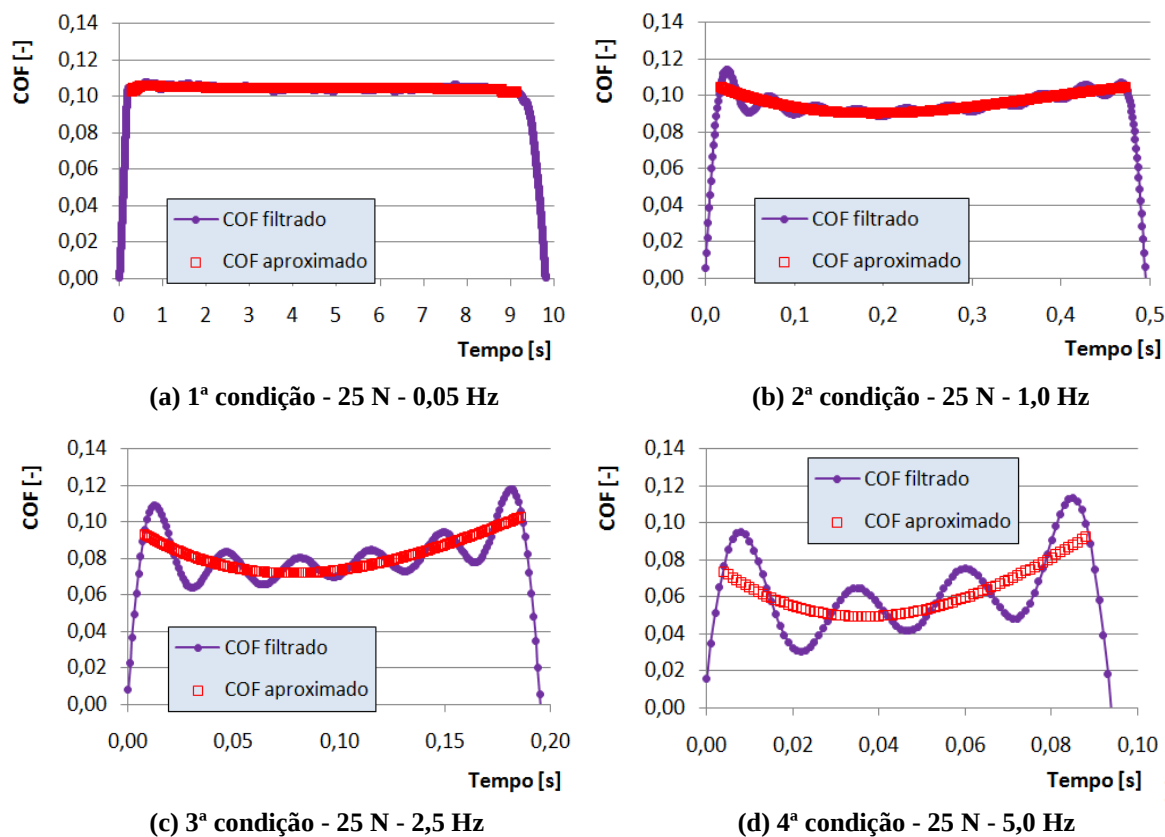


Figura 9. Resultado da filtragem com aproximação polinomial para COF instantâneo para ensaios da 2ª bateria.

A Figura 10 apresenta o resultado do COF em função da posição dentro da pista de deslizamento e do tempo. Esta técnica de avaliação é denominada de triboscopia 3D e facilita a visualização e entendimento dos fenômenos envolvidos no ensaio [22 e 23]. Para esta discussão, foram apresentados a menor e maior força normal, que são 25 e 100 N, respectivamente.

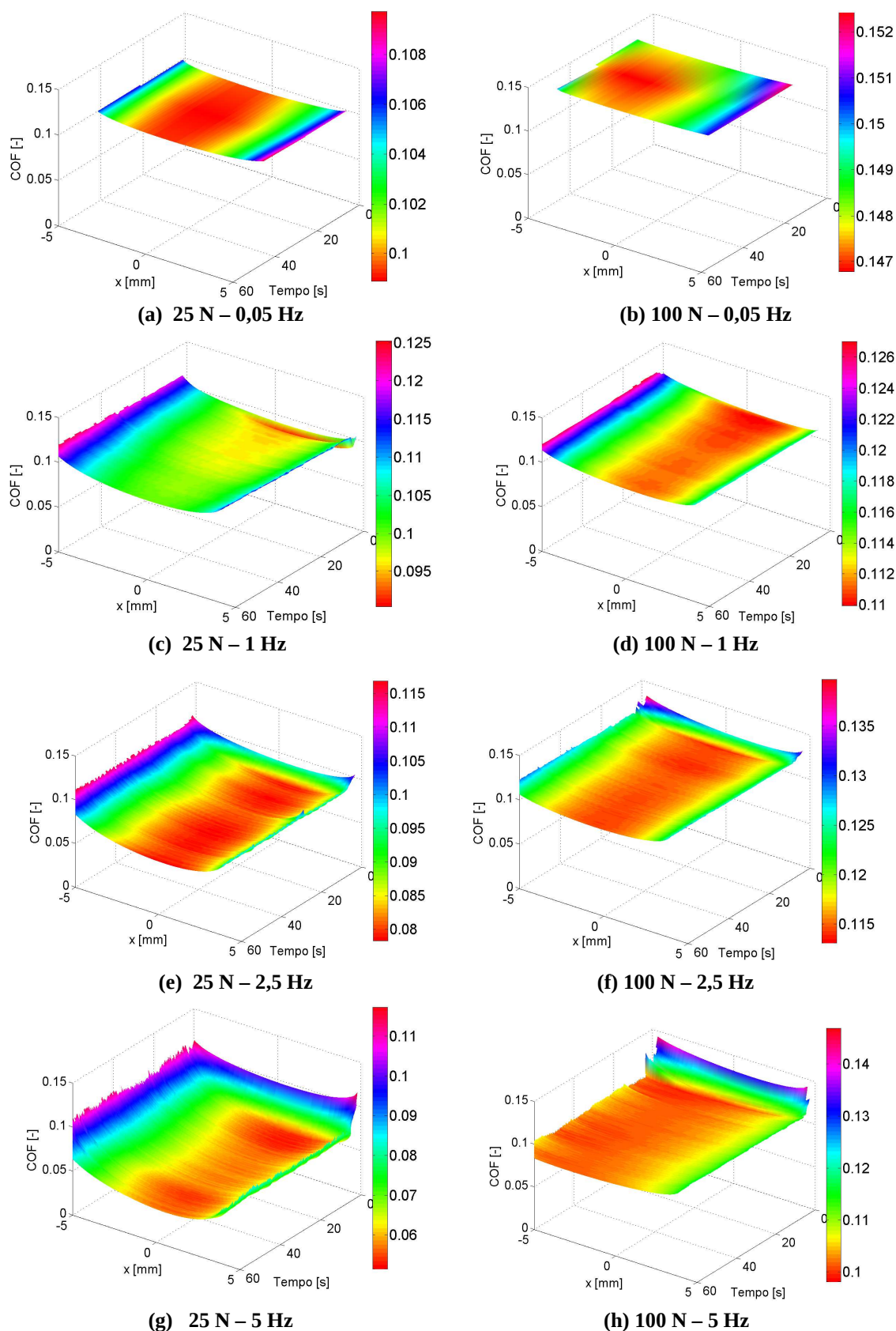


Figura 10. COF instantâneo em função da posição dentro da pista e do tempo de ensaio.

Primeiro, vê-se que para as frequências de 0,05 Hz - Figura 10 (a) e (b) - o COF instantâneo manteve maior constância ao longo de todo o ensaio. Entende-se que, para valores de frequência muito baixas, o efeito de hidrodinâmico seja minimizado devido aos baixos valores de velocidade de deslizamento. Contudo, surpreendentemente, vê-se que o COF assumiu valores distintos para cada condição de força normal. Deste modo, aponta-se uma

dependência do COF em relação à força normal para este tipo de ensaio. Uma possível explicação para este fenômeno é o aumento da área de contato real com o incremento da força normal, o que leva a um aumento da área de junções, e finalmente, a uma maior força tangencial necessária para rompê-las.

Segundo, com o aumento da frequência, o COF apresenta queda cíclica, em relação à posição dentro da pista de deslizamento. Obviamente, este comportamento está associado com a variação de velocidade de deslizamento dentro de um semi-ciclo; apresentado na Figura 8(a); e mostra-se coerente com a teoria de Stribeck.

Terceiro, observa-se uma evolução do COF instantâneo em função do tempo. Este comportamento foi mais efetivo para menores forças normais e maiores frequências. Deste modo, observa-se que alguns segundos de ensaio são necessários para a estabilização do COF instantâneo, e consequentemente do filme de óleo lubrificante. Chama-se a atenção, entretanto, para os valores de COF dos primeiros semi-ciclos (tempo igual a zero), os quais parecem estar relacionados aos valores de COF instantâneos relativos à frequência de 0,05 Hz.

A Figura 11 apresentada os resultados, da 2ª bateria, referentes ao primeiro semi-ciclo após 60 segundos de ensaio, situação na qual o comportamento do filme estaria estabilizado dentro do semi-ciclo. Nesta Figura, todas as forças normais ensaiadas são apresentadas. Em particular, evidencia-se um comportamento dinâmico dentro de um mesmo semi-ciclo. Apesar da simetria da velocidade de deslizamento em relação à posição dentro da pista – Figura 8(a) – o comportamento do COF instantâneo não se apresenta de modo similar, salvo para a menor frequência. Pode-se inicialmente, entender que a simetria deveria acontecer, mas devido a efeitos dinâmicos no fluido isso não ocorre (Costa e Hutchings, 2007). Outro efeito que pode ser relacionado ao comportamento apresentado é o *squeeze film*, que causa um atraso na resposta do coeficiente de atrito a mudança de velocidade. Por exemplo, quando o eixo para, a espessura do filme de óleo não vai para zero instantaneamente. O que se verifica, no entanto, é um tempo para que o filme seja expulso da interface devido à pressão de contato. Para a maioria dos contatos, este tempo é baixo e na ordem de milissegundos (Ludema, 1996).

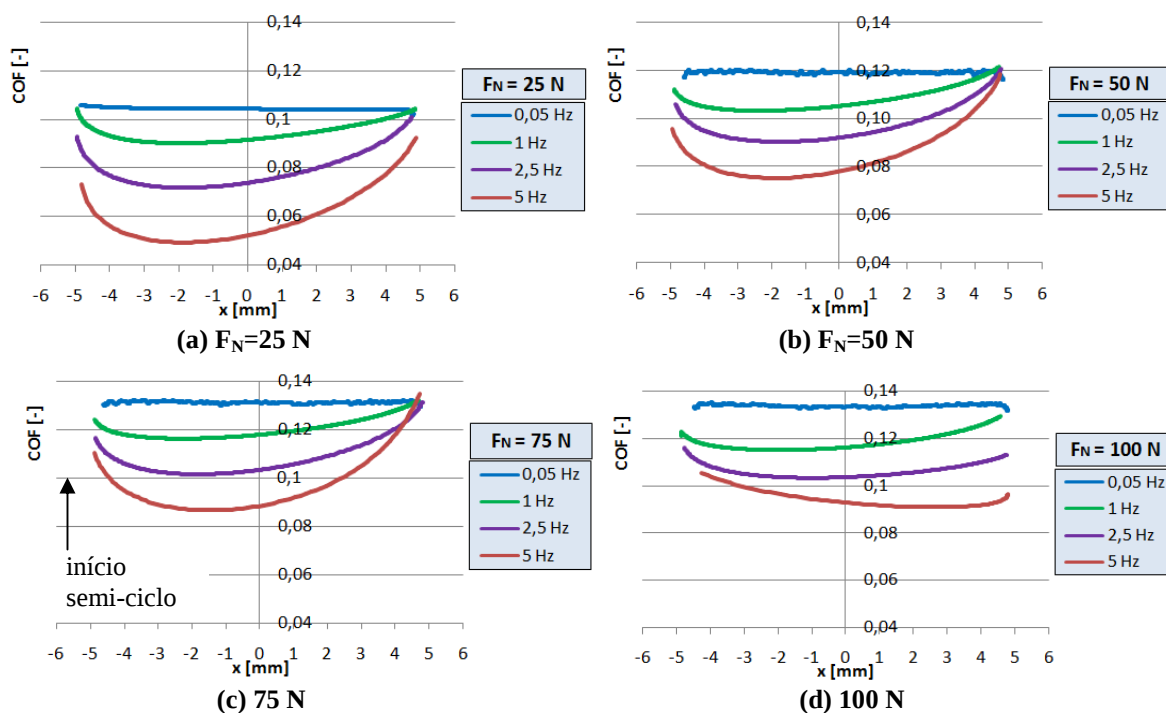


Figura 11. COF instantâneo em função da posição dentro da pista para resultados da 2ª bateria.

Ademais, enfatiza-se que as condições durante um semi-ciclo não são de quase-equilíbrio. Ou seja, cada velocidade de deslizamento acontece de modo instantâneo, obedecendo a aceleração e desaceleração que acontece durante o semi-ciclo. Diante disso, uma hipótese plausível, é considerar que a aceleração (que acontece para x igual a 5 até 0 mm), conduz a um efetivo aumento de filme de óleo, com consequente redução do COF instantâneo. Já a desaceleração (que acontece para x igual a 0 até -5 mm) leva a um aumento do COF instantâneo; supostamente relacionado à instabilidade do filme nesta condição. Inclusive o COF instantâneo no final do semi-ciclo apresenta maior valor do que no início (somente com exceção da força normal de 100 N para as duas maiores frequências). Esta condição de assimetria do COF, apesar de não apresentado com maiores detalhes nesse trabalho, foi verificada para ambos os sentidos de movimento, ou seja, para os dois semi-ciclos. Contudo, o fenômeno foi mais evidente para determinadas condições de ensaio (menores forças normais e frequências intermediárias).

4. Conclusões

Do presente trabalho, em que foi proposta uma metodologia para filtragem de resultados de coeficiente de atrito cinético (COF), aplicado em estudo de caso de ensaio tipo *reciprocating* de anel sobre cilindro, concluiu-se que:

- O parâmetro proposto de coeficiente de atrito energético (COFe) mostrou melhor relação em curvas de Stribeck-like, quando comparado com o coeficiente de atrito médio (COFm). Este melhor resultado do COFe está relacionado com a ponderação do COF instantâneo pelo deslocamento;
- A metodologia proposta de aproximação polinomial do COF instantâneo mostrou-se eficaz, com redução de ruído do sinal e coerência com a teoria de lubrificação hidrodinâmica;
- A metodologia proposta de aproximação polinomial do COF se mostrou eficiente para evidenciar o comportamento desta grandeza em avaliações de triboscopia;
- Nas avaliações tribocópicas de COF instantâneo, verificou-se que frequências de oscilação muito pequenas minimizam o efeito de cunha e de formação de filme; com consequente constância do COF ao longo da pista de deslizamento;
- O COF manteve dependência da força normal ainda que para ensaios lubrificados. Para estes casos, apontou-se predomínio de comportamento de lubrificação limítrofe;
- O COF apresentou queda cíclica em relação à posição dentro da pista, consonante com o comportamento do COF na curva de Stribeck;
- O COF instantâneo reduziu ao longo do tempo de ensaio com tendência a estabilizar após alguns segundos. Este efeito foi mais efetivo para maiores frequências e menores forças normais;
- Notou-se assimetria do COF instantâneo em relação à posição dentro da pista; a qual foi relacionada, por hipótese, a uma menor estabilidade do filme durante a desaceleração do movimento.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao suporte dado pelo PPGEM (Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Materiais). Adicionalmente, nosso agradecimento especial às empresas Tupy e Mahle pelo fornecimento das amostras, incluindo o apoio técnico e financeiro da empresa Tupy através do projeto UTFPR-TUPY (ACT 10/2015). Por fim, nosso agradecimento ao Projeto Triboflex pelas discussões e incentivos para realização desta pesquisa.

6. Referências

- Blau, P. J., "Friction Science and Technology," New York: Marcel Dekker, Inc., 1996.
- CETR-UMT., "Multi-Specimen Test System: Software Reference Manual," Versão: 1.132, 2010.
- Costa, H. L. e Hutchings, I. M., "Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions," *Tribology International* 40: 1227–1238, 2007.
- Dimkovski, Z., Anderberg, C., Ohlsson, R., Rosén, B. G. e Thomas, T. R., "Quantification of the cold worked material inside the deep honing grooves on cylinder liner surfaces and its effect on wear," *Wear* 267: 2235–2242, 2009.
- Galda, L., Pawlus, P., e Sep, J., "Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve," *Tribology International* 42: 1505–1512, 2009.
- Grabon, W., Koszela, W., Pawlus, P. e Ochwat, S., "Improving tribological behaviour of piston ring–cylinder liner frictional pair by liner surface texturing," *Tribology International* 61: 102–108, 2013.
- Guermat, A., Monteil, G. e Bouchetara, M., "Characterization of various coatings in terms of friction and wear for internal combustion engine piston rings," *Mechanika* 17: 208–215, 2011.
- Johansson, S., Nilsson, P. H., Ohlsson, R. e Rosén, B. G., "Experimental friction evaluation of cylinder liner/piston ring contact," *Wear* 271: 625–633, 2011.
- Lenauer, C., Tomastik, C., Wopelka, T. e Jech, M., "Piston ring wear and cylinder liner tribofilm in tribotests with lubricants artificially altered with ethanol combustion products," *Tribology International* 82: 415–422, 2015.
- Ludema, K. C., "Friction, Wear, Lubrication," New York: CRC Press LLC, Inc., 1996.
- MAHLE metal leve, "Manual Técnico: Motores de combustão interna," Disponível em: <[http://www.mahle.com.br/C1256F7900537A47/vwContentByKey/W28HPJTN971STULDE/\\$FILE/Manual_mahle_brochura%20-%2001-98_primeira%20parte.pdf](http://www.mahle.com.br/C1256F7900537A47/vwContentByKey/W28HPJTN971STULDE/$FILE/Manual_mahle_brochura%20-%2001-98_primeira%20parte.pdf)> Acesso em: 13. fev. 2017.
- Profito, F. J., Tomanik, E., Lastres, L. F. e Zachariadis, D. C., "Effect of lubricant viscosity and friction modifier on reciprocating tests," *SAE Technical Paper*, Paper number: 2013-36-0155, 2013.
- Rao, S. S., "Vibrações mecânicas," 4. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2005.

- Santos, M. B., COSTA, H. L. e MELLO, J. D. B., "Potencialidade da triboscopia 3D para monitorar atrito e desgaste," 8º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2015.
- Stachowiak, G. W. e Batchelor, A. W., "Engineering Tribology," 3. ed. EUA: Butterworth Heinemann, 2005.
- Tomanik, E., "Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes," Tribology International 41: 1032–1038, 2008.
- Vale, J. L. Influência da microestrutura de ferros fundidos na ocorrência de metal dobrado e no comportamento tribológico de superfícies brunidas. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, 2016.

METHODOLOGY PROPOSAL OF SIGNALS PROCESSING FOR THE COEFFICIENT OF FRICTION IN RING ON CYLINDER TEST

João Luiz do Vale, joaovale@utfpr.edu.br¹
Carlos Henrique da Silva, carloschs@utfpr.edu.br²
Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br²

¹Federal University of Technology - Paraná – UTFPR – Campus Londrina.
UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Pioneiros Avenue, 3131. Londrina – Paraná – Brasil
ZIP CODE 86036-370

²Federal University of Technology - Paraná – UTFPR – Campus Curitiba.

Resumo: Reciprocating tests are commonly applied to tribological evaluation. However, this type of test is susceptible to vibration issues (self-excitation), system's stiffness, suspensions, among others. Adds up, it can be seen a greater difficulty in processing the data and presenting the results. This article presents methodologies and filtering discussion for coefficient of friction (COF) data in reciprocating tests applied to a case study: ring on cylinder liner test. A clamping device were developed, designed in the laboratory and surface contact (LASC) UTFPR, for the CETR-UMT tribometer - Bruker. The samples were cylinder liners from engine block of compacted graphite iron; and counter-bodies were piston rings (compression type) stainless steel nitrided with asymmetrical profile. Tests were performed immersed in SAE 30 CF oil with low formulation. The contact temperature was controlled and maintained at 40 °C. A comparison was done between average COF, widely used in the literature, and an authors' COF parameter proposal, which is calculated through energy assessments dissipated in the half cycle. Energy COF showed lower dispersion of data when presented in Stribeck-like curves. Also, a comparison was made between two types of filtering to triboscopic evaluation. The first was the moving average, which is commonly used in these kind of data treatments. The second, proposed by the authors, consists in applying low pass filter (Fourier) with posterior COF approach by third order polynomials. It was found that both techniques exhibit softening trend, showing similar results to the central regions of the stroke. However, moving average shows COF distortions at starting and ending of the stroke. The polynomial approximation, in its turn, appeared more consistent with the film-forming theory and the Stribeck curve. Finally, triboscopic studies applying this method proved to be relevant for COF evaluation along stroke. COF asymmetric behavior was observed and COF reduce its value with the decrease of the normal load applied. In addition, favorable and unfavorable conditions for oil film formation were identified.

Keywords: coefficient of friction; Reciprocating test; Signal processing; Stribeck-like curves; Triboscopy.