

MEDIÇÃO DE CAPACITÂNCIA PARA AVALIAÇÃO DA ESPESSURA DE FILME LUBRIFICANTE EM CONTATOS DESLIZANTES¹

Henara L. Costa²
Ian M. Hutchings³

Resumo

Um aparato experimental foi desenvolvido para estimar a espessura de um filme lubrificante em ensaios de deslizamento através de medições de capacitância. Em ensaios de deslizamento, um capacitor é formado pelas duas superfícies condutoras deslizantes e o filme lubrificante dielétrico entre elas. Um circuito eletrônico foi desenvolvido para viabilizar as medições de capacitância. O princípio e o funcionamento do circuito são descritos no trabalho, sendo que equações correlacionando medições de voltagem e capacitância foram desenvolvidas. O aparato desenvolvido foi aplicado a um ensaio de deslizamento alternado para avaliar o efeito de texturização superficial de superfícies no seu comportamento tribológico. Para a análise dos dados dos ensaios de deslizamento, um procedimento foi desenvolvido para calcular um *stroke* médio através de um programa computacional. As amostras texturizadas foram obtidas por texturização fotoquímica. Apesar de variações devido à texturização no atrito aparente entre as superfícies não terem sido identificadas, a espessura do filme hidrodinâmico entre elas variou significativamente.

Palavras-chave: Espessura de filme lubrificante; Capacitância; Ensaios de deslizamento; Texturização superficial.

CAPACITANCE MEASUREMENTS TO EVALUATE LBRICANT FILM THICKNESS IN SLIDING CONTACTS

Abstract

Capacitance measurements were used to evaluate lubricant film thickness in sliding contacts. A capacitor is formed by the two conducting sliding surfaces and the dielectric lubricant film between them. The working principle and governing equations of the electronic circuit used in the capacitance measurements are presented in this paper. The apparatus was applied in reciprocating sliding tests to evaluate the effect of surface texturing on tribological behaviour. In the data analysis, a special procedure was used to compute an average stroke. Photochemical texturing was used to manufacture the textured samples. Although variations in friction due to surface texturing were not detected, the hydrodynamic lubricant film thickness varied significantly.

Key words: Lubricant film thickness; Capacitance; Sliding tests; Surface texturing.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Autor para correspondência, Laboratório de Tribologia e Materiais, Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: ltm-henara@ufu.br

³ Institute for Manufacturing, University of Cambridge, England, e-mail: imh2@cam.ac.uk

1 INTRODUÇÃO

Várias técnicas podem ser utilizadas para medir a espessura de filmes lubrificantes entre superfícies deslizantes, sendo que uma das principais é a interferometria ótica. Nesta técnica, uma das duas superfícies deslizantes é transparente, de forma que o mapa interferométrico do contato é analisado utilizando-se um microscópio. A superfície transparente é geralmente coberta com uma fina camada anti-reflexiva.⁽¹⁾ Quando luz passa através do vidro, ela sofre uma divisão de amplitude, sendo que um dos feixes é refletido diretamente da camada anti-reflexiva. Um outro feixe passa através do filme lubrificante antes de ser refletido pela superfície da amostra não-transparente, de forma que ele viaja um comprimento duas vezes a espessura do filme maior que o primeiro feixe. A recombinação destes feixes poderá gerar interferência construtiva ou destrutiva. Para calibrar as franjas de interferência, em geral encosta-se uma lente esférica cromada sobre a amostra transparente. Neste caso, a espessura do filme é zero no centro e em uma posição r a espessura h_0 é dada por $h_0=r^2/2R$, onde R é o raio da lente.

Alternativas para as caras e complexas medições por interferometria ótica, são medições elétricas do contato. Uma das mais simples envolve a medição elétrica da resistência do contato e tem sido usada desde o início dos anos 1940 para detectar a presença de filmes isolantes entre superfícies deslizantes.⁽²⁾ Posteriormente, um aparato semelhante foi projetado especificamente para estudar a transição entre lubrificação hidrodinâmica e lubrificação limite em contatos tipo esfera-sobre-cilindro.⁽³⁾ Porém, esta técnica restringe-se principalmente a detectar a presença ou ausência de filme lubrificante, mas não fornece muita informação sobre a espessura deste filme.

Quando transdutores indutivos de proximidade são utilizados, o contato lubrificado é usado como uma das partes de um circuito de armadura de uma pequena bobina, excitada por uma voltagem AC. Qualquer movimento entre a bobina e o contato produz uma mudança de indutância, que pode ser diretamente correlacionada com a amplitude do movimento.⁽⁴⁾

Uma outra medição elétrica possível no contato é a capacitância entre duas superfícies deslizantes.⁽⁵⁻⁷⁾ A vantagem desta técnica é que o valor da capacitância depende da espessura do filme, fornecendo muito mais informação a respeito do regime de lubrificação no contato.⁽⁸⁾

No presente trabalho, um circuito eletrônico mais sofisticado que os apresentados na literatura foi desenvolvido. São descritos o desenvolvimento do aparato eletrônico, o procedimento de calibração e como este aparato foi utilizado em ensaios de deslizamento lubrificado alternado. Além disso, uma nova metodologia foi desenvolvida para utilizar estas medições em ensaios alternados. Ao invés de medir-se uma capacitância média para as diferentes velocidades em cada ponto de um *stroke*, a capacitância foi medida em função da velocidade da cada ponto.

2 DEFINIÇÃO DE CAPACITÂNCIA

Um capacitor é um dispositivo com dois terminais que consiste de dois condutores separados por um material dielétrico, geralmente utilizado em eletrônica com um componente passivo que armazena energia na forma de um campo eletrostático. Por exemplo, para duas placas condutoras paralelas finas de seção transversal A separadas por uma pequena distância h , se uma diferença de potencial V for aplicada, uma carga $+Q$ será gerada em uma das placas e $-Q$ na outra placa. Esta carga distribui-se de maneira uniforme sobre as placas, originando uma densidade de carga $\sigma = \pm \frac{Q}{A}$ em cada placa. O campo resultante

gerado é perpendicular às placas e de magnitude $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$, onde ϵ é a permissividade do meio que separa as duas superfícies. A permissividade é o produto de uma permissividade relativa ϵ_r e da permissividade do vácuo $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m. A diferença de potencial entre as placas é dada por $V = \frac{E}{d} = \frac{\sigma \cdot h}{\epsilon}$. A capacitância C é a relação entre a carga armazenada e a diferença de potencial gerada pela carga:⁽⁹⁾

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{h_0} \quad \text{Eq. 1}$$

A capacitância depende somente das características geométricas do capacitor. Cálculos para diferentes geometrias de capacitores podem ser encontrados na literatura. Para o caso de um cilindro paralelo a uma placa infinita em um meio de constante dielétrica ϵ_r , a capacitância (C) depende do comprimento (l) e do raio (R) do cilindro e da espessura do filme dielétrico (h_0):⁽⁹⁾

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 l}{\cosh^{-1}\left(1 + \frac{h_0}{r}\right)} \quad \text{Eq. 2}$$

Para valores de h_0 muito pequenos quando comparados com o tamanho da placa, esta pode satisfatoriamente ser considerada como infinita.

3 CONCEPÇÃO DO CIRCUITO

Em ensaios de desgaste lubrificado de amostras metálicas, o corpo e o contra-corpo podem ser tratados como dois condutores separados por um filme dielétrico lubrificante, o que constitui um capacitor. A configuração geométrica do contato usado neste trabalho é mostrado na Figura 1. O comprimento do contra-corpo cilíndrico (l) foi de 16 mm. Os diâmetros utilizados (D) foram de 16 and 200 mm. A permissividade relativa do óleo ϵ_r foi considerada 2,5.

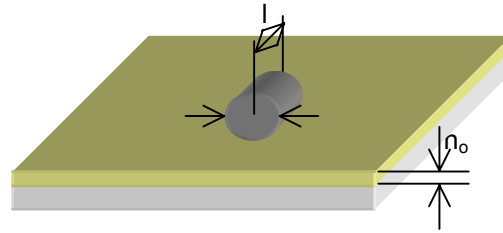


Figura 1. Geometria do capacitor criado pelo deslizamento entre corpo e contra-corpo.

Variações no valor da capacitância provocam um desbalanço do circuito tipo ponte de Wien modificado mostrado na Figura 2, o qual é refletido pelo sinal de tensão entre os pontos 2 and 4.

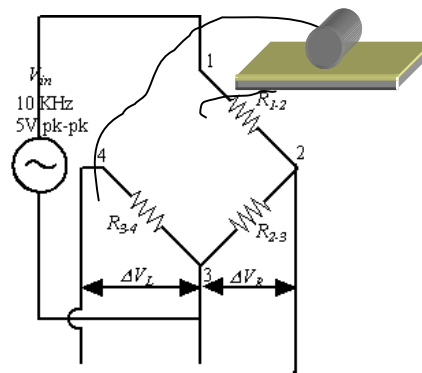


Figura 2. Circuito tipo ponte de Wien modificado para medição de capacitância.

Se a tensão entre os pontos 2 e 3 (ΔV_R) e entre os pontos 3 and 4 (ΔV_L) são medidas, estes dois sinais podem em seguida tratados de forma diferencial. Entretanto, é importante garantir-se que o sistema de medição não carregue o circuito. Para resolver este problema, amplificadores operacionais de alta impedância de entrada (*buffers*), com um ganho muito próximo a 1, foram utilizados. A saída de cada um dos *buffers* alimenta um terceiro amplificador operacional com um ganho A_v , de modo que sua saída seja a diferença de potencial entre os pontos 2 and 4, amplificado por um ganho A_v . Finalmente, este sinal diferencial é retificado. A representação esquemática de todo o circuito é apresentada na Figura 3.

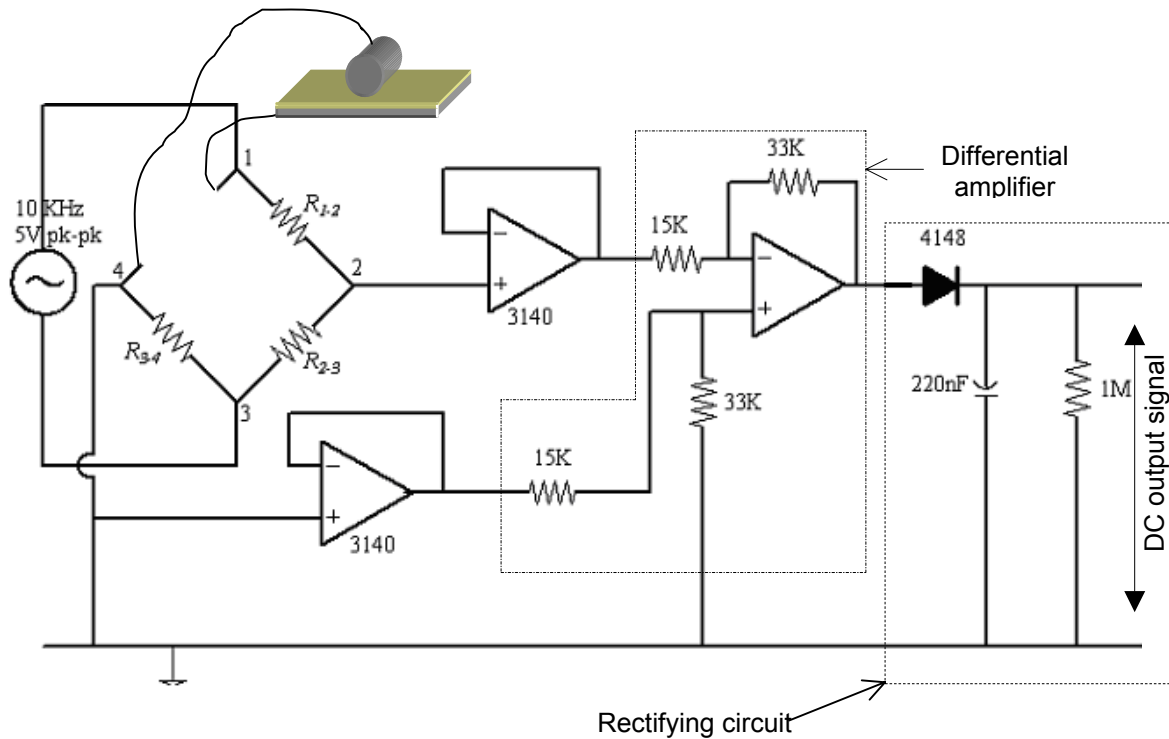


Figura 3. Circuito eletrônico completo.

A espessura mínima de filme h_o entre um cilindro deslizante e uma superfície plana devido a pressão hidrodinâmica depende da viscosidade do lubrificante (η), da carga normal (P), da velocidade (U) e do comprimento (l) e do raio (R) do cilindro:⁽¹⁰⁾

$$h_o = \frac{4.89\eta R U l}{P}$$

Eq. 3

Esta equação pode ser utilizada a estimar a faixa de valores esperada para h_o dependendo da geometria das amostras, das cargas e das velocidades a serem utilizadas. Em seguida, com estes valores de h_o e utilizando-se a Eq. 2, a faixa de capacitâncias esperada pôde ser calculada como sendo entre 50 and 900 pF para um diâmetro de 200 mm. Através da solução analítica do circuito mostrado na Figura 3, estes valores guiaram a escolha dos resistores R_{1-2} , R_{2-3} and R_{3-4} to que compõem a ponte, de forma a obter-se uma variação aproximadamente linear entre capacitância e a diferença de potencial medida dentro da faixa de interesse.

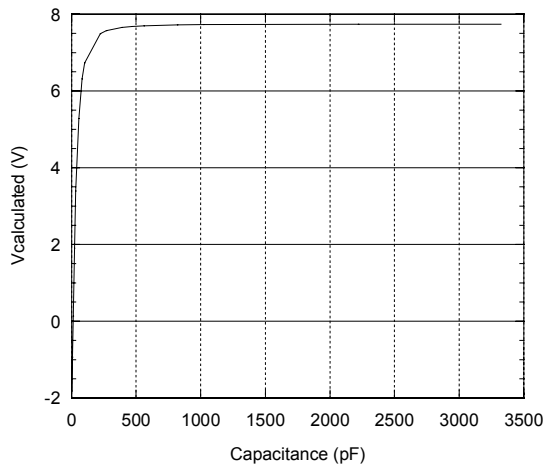
A Figura 4 mostra exemplos de curvas de calibração esperadas, utilizando-se a solução analítica do circuito, para quatro diferentes combinações de resistores. Em (a), acima de 100 pF, a variação de voltagem com capacitância é muito pequena. Em (b), a faixa de variação significativa entre tensão e capacitância aumenta. Em (c), tem-se uma variação aproximadamente linear entre tensão e capacitância para a faixa de capacitâncias entre 50 and 1000 pF. Em (d), apesar de o comprimento de variação linear entre tensão e capacitância ter aumentado, a variação na faixa de capacitâncias entre 50 pF and 1000 pF é muito pequena. Para um diâmetro de cilindro de 200 mm, escolheu-se então uma configuração de resistores composta de $R_{1-2} = 470$ k Ω , $R_{2-3} = 4.7$ k Ω and $R_{3-4} = 27$

k Ω . Procedimento semelhante foi usado para um diâmetro de cilindro de 16 mm, o que levou aos seguintes resistores: $R_{1-2} = 470$ k Ω , $R_{2-3} = 4.7$ k Ω , $R_{3-4} = 47$ k Ω .

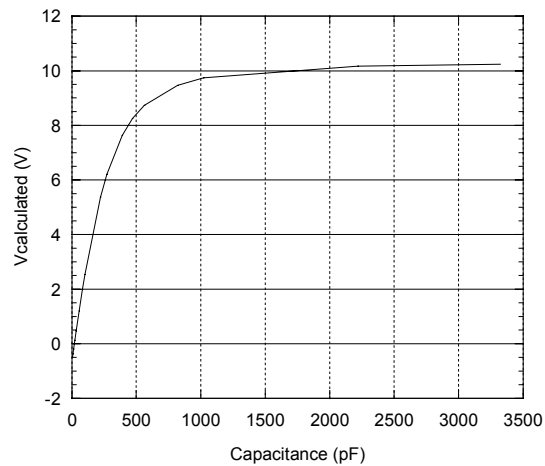
4 CALIBRAÇÃO DO CIRCUITO

Capacitores fixos foram utilizados para calibrar o circuito. Inicialmente, estes capacitores fixos foram conectados diretamente à caixa que continha o circuito. A Figura 5 compara a curva experimental de calibração para o cilindro de 16 mm e curva teórica obtida da solução analítica do circuito. Para o cilindro de 200 mm, as curvas de calibração são apresentadas na Figura 6. Existe uma discrepância bastante significativa entre os valores reais de capacitância (capacitores fixos) e os valores calculados analiticamente, para capacitâncias que corresponderiam a tensões menores que zero, uma vez que a porção retificadora do circuito não permite a medição de tensões negativas. Para capacitâncias que correspondem a sinais de tensão positivos, há uma correlação razoável entre os valores medidos e calculados.

Para avaliar a presença de capacitância adicional associada com os cabos e com o isolamento das amostras, chamado C_{CS} , os capacitores fixos também foram conectados entre corpo e contra-corpo, ao invés de diretamente na caixa do circuito. Neste caso, uma placa isolante de polietileno com espessura de 1,4 mm separou o corpo e o contra-corpo. As curvas de calibração para esta configuração também são mostradas nas Figuras 5 e 6. A capacitância associada ao isolamento entre corpo e contra-corpo (C_{NC}) e a capacitância devido aos cabos e demais isolamentos (C_{CS}) estavam em paralelo com os capacitores fixos usados na calibração, de forma que estes podiam ser simplesmente adicionados para obter-se uma capacitância total.



(a)



(b)

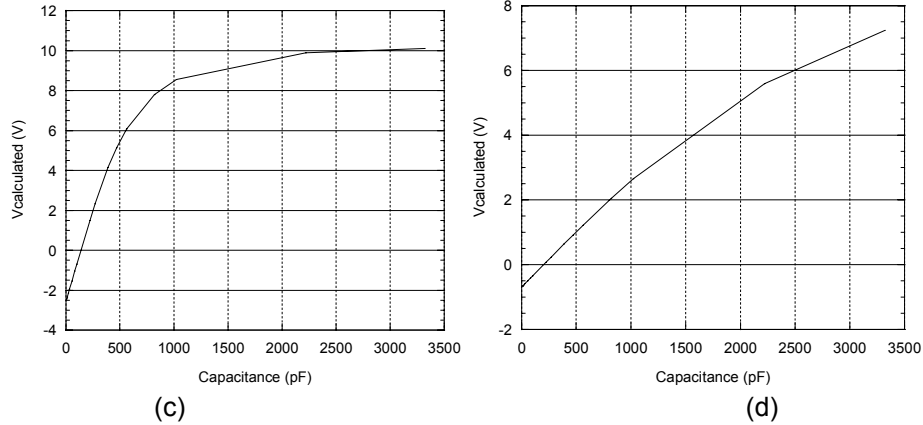


Figura 4. Variação calculada entre a tensão DC de saída V_o e a capacitância C_x para quatro diferentes configurações de resistores: (a) $R_{1-2} = 470 \text{ K}\Omega$, $R_{2-3} = 150 \text{ K}\Omega$, $R_{3-4} = 330 \text{ K}\Omega$; (b) $R_{1-2} = 470 \text{ K}\Omega$, $R_{2-3} = 4.7 \text{ K}\Omega$, $R_{3-4} = 47 \text{ K}\Omega$; (c) $R_{1-2} = 470 \text{ K}\Omega$, $R_{2-3} = 4.7 \text{ K}\Omega$, $R_{3-4} = 27 \text{ K}\Omega$; (d) $R_{1-2} = 470 \text{ K}\Omega$, $R_{2-3} = 4.7 \text{ K}\Omega$, $R_{3-4} = 5 \text{ K}\Omega$.

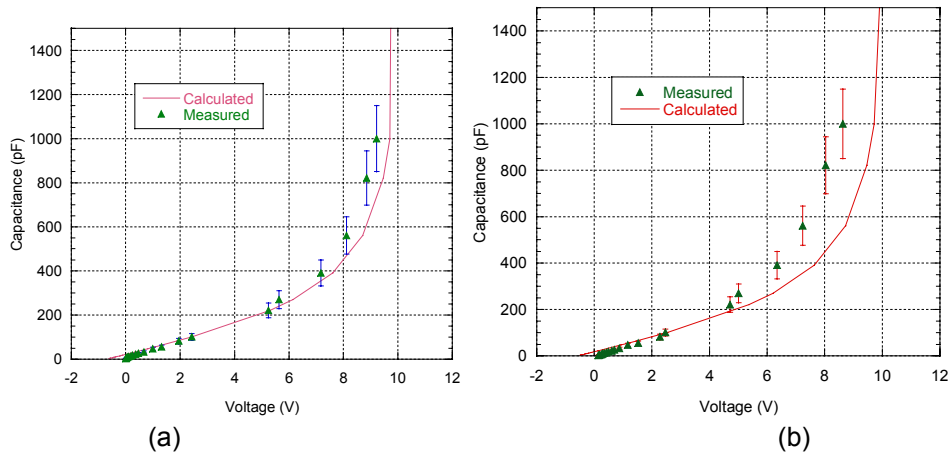


Figura 5. Comparação entre as curvas de calibração obtidas experimentalmente e pela solução analítica; diâmetro do cilindro = 16 mm: (a) capacitores conectados diretamente ao circuito; (b) capacitores conectados ao contato.

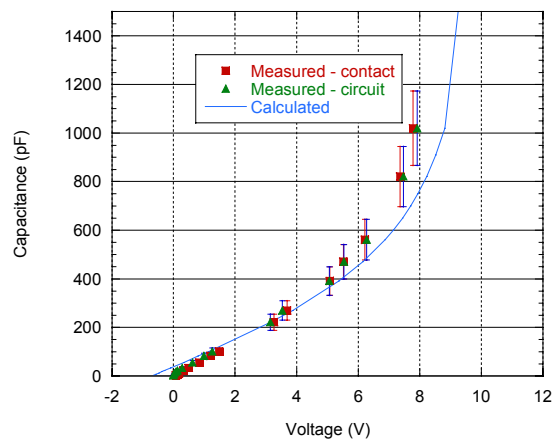


Figura 6. Comparação entre as curvas de calibração obtidas experimentalmente e pela solução analítica; diâmetro do cilindro = 200 mm.

Quando se colocou uma placa isolante espessa de polietileno entre o corpo e o contra-corpo, a voltagem medida quando estes eram ligados por um fio condutor corresponde à soma de C_{cs} e C_{NC} , uma vez que eles estão em paralelo. A capacitância criada pelo isolamento entre o corpo e contra-corpo C_{NC} pôde ser calculada pela Eq. 2. ($R = 8$ mm, $h_o = 1,4$ mm e $\epsilon_{\text{polietileno}} = 2,3$) como sendo 3,6 pF. A tensão medida foi 0,08 V. De acordo com a Figura 5, esta tensão corresponde a uma capacitância de aproximadamente 10,4 pF. Portanto, C_{cs} é dada por 10.4 pF – 3.6 pF = 6.8 pF. Este valor deve ser levado em consideração ao medir-se capacitância com este sistema. Procedimento de correção semelhante foi adotado para o cilindro de 200 mm, o que indicou C_{cs} igual a = $3,8$ pF.

Para checar a acuracidade da instrumentação proposta, esta foi aplicada para medir a espessura de um filme isolante de espessura conhecida. Inicialmente, a espessura de um filme fino de polietileno foi medida utilizando-se um perfilômetro Taylor-Hobson Talysurf 10, onde obteve-se um valor de $8 \pm 0,13$ μm for para vinte medições aleatórias. Em seguida, a espessura do filme foi medida com a instrumentação proposta. Para o cilindro de 16 mm, esta espessura corresponde a uma capacitância de 40 pF. A medida de capacitância com a instrumentação proposta foi de 26,2 pF, o que dá um erro de 34,5%. Para o diâmetro de 200 mm, a capacitância correspondente é de 144 pF. A instrumentação mediu uma capacitância de 111,2 pF, o que corresponde a um erro de 23%.

Durante a realização dos testes, a capacitância medida é devida tanto ao filme de óleo entre corpo e contra-corpo quanto ao restante do óleo contido no reservatório, como mostrado na Figura 7-a. Nesta figura C_{run} , pode ser considerada como a soma de duas capacitâncias em paralelo. Para avaliar a capacitância gerada pelo restante do óleo no reservatório, foi efetuada uma medição auxiliar, com uma placa espessa de polietileno entre corpo e contra-corpo e o reservatório cheio de óleo, chamada C_3 (Figura 7-c). Subtraindo-se a capacitância relativa à configuração mostrada em na Figura 7-b ($C_{NC} + C_{cs}$) de C_3 , a capacitância devida somente ao filme de óleo (C_{film}) pode ser dada pela Eq. 4. Um método de correção equivalente mas ligeiramente diferente foi usado por Crook⁽⁶⁾.

$$C_{film} = C_{run} - (C_3 - (C_{cs} + C_{NC})) \quad \text{Eq. 4}$$

Para um diâmetro de 16 mm, $C_{film} = C_{run} - (12.4 \text{ pF} - 10.3 \text{ pF})$. Para um diâmetro de 200 mm, $C_{film} = C_{run} - (15 \text{ pF} - 12 \text{ pF})$.

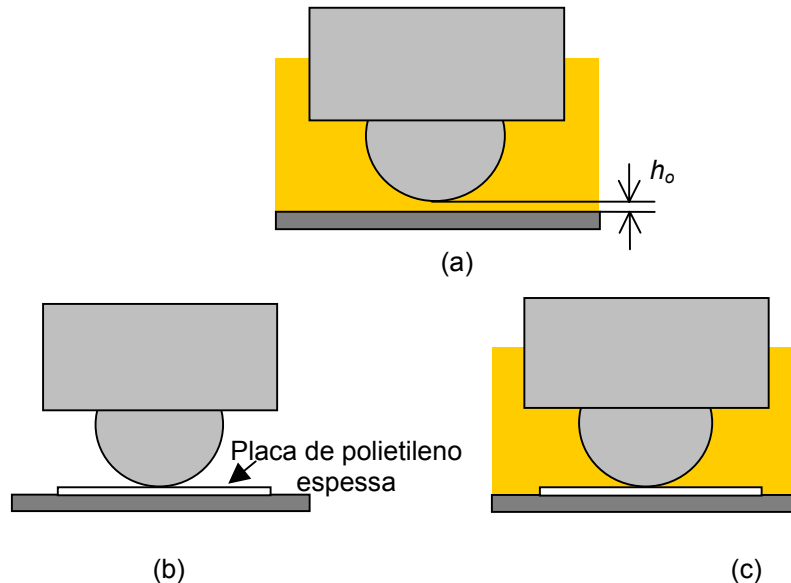


Figura 7. Efeito da capacitância pelo óleo contido no restante do reservatório: (a) medição real durante um teste; (b) medição com uma placa de polietileno espessa isolando contato; (c) medição com uma placa isolante e o reservatório cheio de óleo.

5 APLICAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DESENVOLVIDA A ENSAIOS DE DESLIZAMENTO ALTERNADO

5.1 Procedimentos Experimentais

Ensaios de deslizamento alternado lubrificados foram utilizados para avaliar-se a instrumentação desenvolvida. O ensaio alternado foi escolhido porque sua velocidade variável dentro de cada *stroke* garante a obtenção de espessuras de filme hidrodinâmica variáveis em um único teste. A frequência dos testes foi de 0.55 Hz, o comprimento de cada *stroke* (amplitude do movimento) foi de 22 mm. Como lubrificante, utilizou-se um óleo mineral sem aditivos com viscosidade dinâmica 20 °C de 1,5 Pa. A temperatura ambiente foi mantida constante em 20°C. Contra-corpos cilíndricos polidos com diâmetros de 16 e 200 mm foram utilizados. Um sistema porta-amostras composto de dois cilindros perpendiculares garantiu o alinhamento da carga normal durante os ensaios. Uma carga normal de 51,5 N foi aplicada por peso morto. As variáveis medidas continuamente durante os ensaios foram a força de atrito e a capacitância. A obtenção de um regime permanente foi avaliada pela espessura do filme lubrificante, sendo que os dados somente foram coletados após um filme lubrificante estável ser detectado. Após a obtenção do regime permanente, os dados de atrito e capacitância foram coletados para um total de 150 ciclos, utilizando-se um sistema de aquisição tipo USB (*Iotech Datasuttle* USB55) com uma frequência de amostragem de 37 Hz.

5.2 Resultados e Discussão

Os sinais de tensão DC medidos em cada ponto do ensaio eram convertidos através de curvas de calibração em valores de capacitância. Como

exemplo, a Figura 8 mostra valores medidos entre tempos de ensaio de 149 e 154 s. Observa-se claramente que tanto a força de atrito quanto a capacitância seguem padrões aproximadamente regulares e cíclicos, que correspondem a cada diferente stroke do ensaio. Os pontos correspondentes a uma força de atrito zero são os pontos de reversão onde o movimento muda de direção. A velocidade dentro de cada stroke varia de forma senoidal, de zero nos pontos de reversão do movimento, a um valor máximo no meio de cada stroke. É interessante então se computar um stroke médio, cujos pontos são uma média de pontos correspondentes em strokes consecutivos ao longo do comprimento de cada teste. Por exemplo, o atrito médio \bar{F} para o ponto A no stroke médio, mostrado na Figura 8-b, que encontra-se a uma distância t_1 do ponto de reversão (força zero) é dada por $\bar{F} = \left[\sum_{i=1}^n F(A_i) \right] / n$, onde A_i são pontos em strokes consecutivos a uma distância t_1 do ponto de reversão e n é o número de ciclos.

Utilizando-se a Eq. 2 e os valores de capacitância, a espessura de filme hidrodinâmica h_o foi calculada em cada ponto do stroke médio.

A Figura 9 mostra o efeito da porcentagem de área texturizada sobre a força de atrito e a espessura de filme. Observa-se que a variação da porcentagem de área texturizada não influencia de forma significativa a força de atrito. Tal comportamento já foi observado por vários outros autores para situações envolvendo lubrificação hidrodinâmica.^(11,12) Por outro lado, variações significativas podem ser detectadas na espessura do filme. Acredita-se que as depressões individuais que formam as texturas funcionem como cunhas convergentes, que podem aumentar o efeito hidrodinâmico, ou seja, pode funcionar como um micro mancal hidrodinâmico.⁽¹³⁾

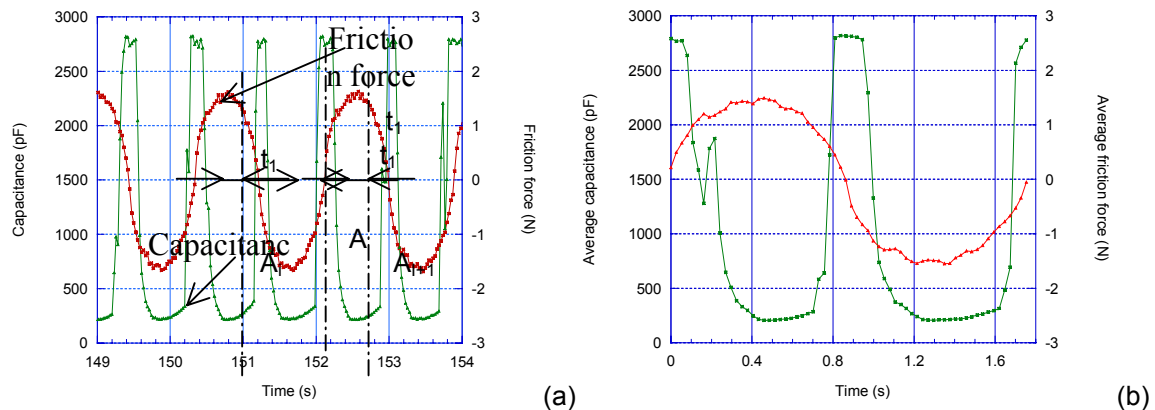


Figura 8. Metodologia para análise de dados: (a) – uma seqüência de ciclos; (b) – stroke médio.

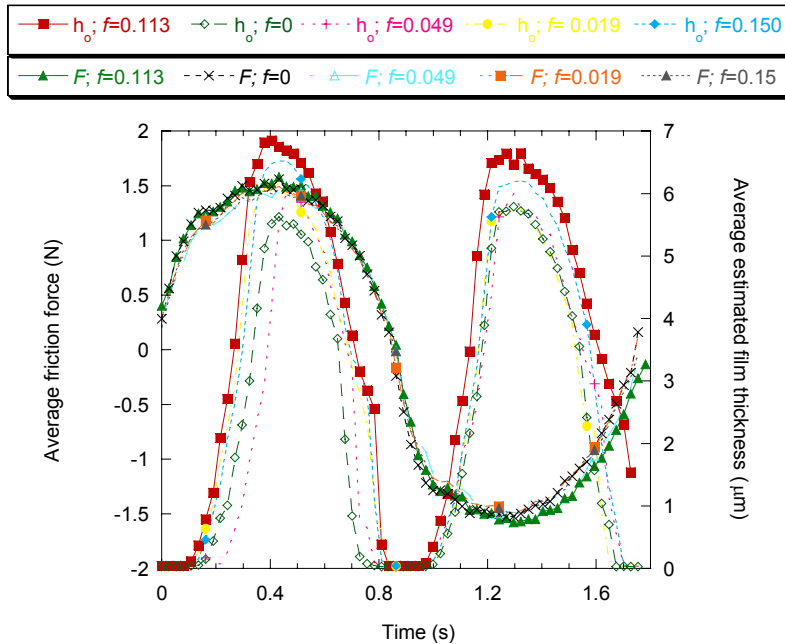


Figura 9. Efeito da porcentagem de texturização sobre a força de atrito e a espessura de filme lubrificante.

6 CONCLUSÕES

- Uma instrumentação foi implementada para medição da espessura de filmes lubrificantes em contatos deslizantes, baseada em medições de capacitância.
- O circuito eletrônico desenvolvido mostrou-se adequado, com comportamento aproximadamente linear para valores de capacitância entre 50 e 1000 pF.
- A acuracidade do sistema para medir espessuras de filmes foi entre 20 e 30%.
- O aparato desenvolvido foi implementado em ensaios de deslizamento alternado. Ele permitiu identificar o efeito de texturização superficial na lubrificação hidrodinâmica e, conseqüentemente, na espessura do filme de lubrificante.

REFERÊNCIAS

- 1 Wedeven, L.D. and C. Cusano, Elastohydrodynamic film thickness measurements of artificially produced surface dents and grooves. Transactions of ASLE, vol. 22n.(4), p. 369-381, 1978.
- 2 Courtney-Pratt, J.S. and G.K. Tudor, An analysis of the lubrication between the piston rings and cylinder wall of a running engine. Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 155, p. 293-299, 1946.
- 3 Furey, M.J., Metallic contact and friction between surfaces. Transactions of ASLE, vol. 4, p. 1-11, 1961.

- 4 Wing, R.D. and O. Saunders, Oil film temperature and thickness measurements on the piston rings of a diesel engine. Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 186n.(1), p. 1-9, 1972.
- 5 Lewicki, W., Some physical aspects of lubrication in rolling bearings and gears. The Engineer, vol. 200, p. 212-215, 1955.
- 6 Crook, A.W., The lubrication of rollers. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, vol. 250n.(981), p. 387-409, 1958.
- 7 Alliston-Greiner, A.F. and J.A. Greenwood, Thickness measurements and mechanical properties of reaction films formed by zinc dialkyldithiophosphate during running. Proc. Instn. Mech. Engrs., vol., p. 565-572, 1987.
- 8 Costa, H.L., *Modification of surface topography: manufacturing methods and applications*, in *Engineering Department*. 2005, University of Cambridge: Cambridge. p. 240.
- 9 Halliday, D., R. Resnick, and J. Walker, *Fundamental of Physics*. New York: Wiley & Sons. 2001
- 10 Williams, J.A., *Engineering Tribology*. Oxford: Oxford University Press. 1994
- 11 Pettersson, U. and S. Jacobson, Friction and wear properties of micro textured DLC coated surfaces in boundary lubricated sliding. Tribology letters, vol. 17n.(3), p. 553-559, 2004.
- 12 Kovalchenko, A., et al., The effect of laser texturing of steel surfaces and speed-load parameters on the transition of lubrication regime from boundary to hydrodynamic. Tribology Transactions, vol. 47n.(2), p. 299-307, 2004.
- 13 Costa, H.L. and I.M. Hutchings, Reciprocating lubricated sliding on textured steel surfaces. accepted for publication, Tribology International, vol., 2007.