

ENSAIOS DE PINO-SOBRE-DISCO DO AÇO ABNT H13 COM TOPOGRAFIA ESTRUTURADA EM CONDIÇÕES DE DESLIZAMENTO A SECO¹

Mario Vitor Leite²
Jose M. Ramos Gomes³
Amilton Sinatora⁴

Resumo

Ensaio do tipo pino-sobre-disco foram utilizados para estudar duas topografias obtidas por fresamento de alta velocidade resultantes das combinações em dois níveis dos parâmetros de corte: velocidade e profundidade de corte, penetração de trabalho e avanço por dente. Estas topografias foram empregadas no disco de aço ABNT H13, temperado e duplamente revenido para uma dureza superior a do material utilizado no pino, o aço ABNT 4140. Carga e velocidade foram mantidas constantes em 150 N e 0,05 ms⁻¹, respectivamente. Os mecanismos de desgaste foram caracterizados por macroscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. O procedimento utilizado possibilitou identificar que o desgaste ocorre por adesão e sulcamento sendo que o último pode ser evitado quando removido o efeito das modificações superficiais sofridas pelo material de menor dureza. O procedimento utilizado possibilitou estudar em condições laboratoriais os mecanismos de desgaste por deslizamento a seco de superfícies com topografia estruturadas.

Palavras-chave: Topografia estruturada; Mecanismos de desgaste; Deslizamento a seco; Pino-sobre-disco.

PIN-ON-DISC TESTS OF TEXTURED TOOL STEEL SURFACES IN DRY SLIDING

Abstract

Two different textured surfaces obtained by high speed milling process with the combination of two levels of the cutting parameters (cutting speed, depth of cut, working engagement and feed per tooth) was studied using a pin-on-disc tribometer. The topographies were impressed in a quenched and double tempered ABNT H13 steel disc, with higher hardness than the material used in the sliding contact, ABNT 4140 steel. Load and speed were kept constant at 150 N and 0.05 ms⁻¹, respectively. The pin was changed every 2 seconds in order to maintain the topography of the softer material. The worn surfaces were characterized by optic and scanning electron microscopy. The results obtained by this procedure indicate that avoiding topography changes in the softer material prevent the ploughing of the harder material. The method described in the present work is suitable to the study of the wear in dry sliding conditions of textured surfaces in laboratory environment.

Key words: Textured surfaces; Mechanisms of wear; Dry sliding; Pin-on-disc.

¹ *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Gainhas - PE*

² *M.Eng. Doutorando do Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.*

³ *Dr. Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, Guimarães – Portugal.*

⁴ *Dr. Professor licenciado do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.*

1 INTRODUÇÃO

É senso comum saber que qualquer objeto quando submetido ao uso sofrerá o desgaste. Por outro lado, poucos sabem como antecipar a forma na qual irá ocorrer este fenômeno, que basicamente pode ser de três formas: por fusão, por dissolução química ou ainda por separação física dos átomos da superfície.⁽¹⁾

A ciência destinada a enfrentar o desafio da prevenção do desgaste é a Tribologia, do grego tribos (τριβος) que significa roçar-esfregar, enunciada pela primeira vez no Comitê do Departamento Britânico da Educação e Ciência, em 9 de março de 1966 e definida como a “Ciência e Tecnologia de superfícies que se interagem em movimento relativo – e práticas e assuntos correlatos.”⁽²⁾

As principais características do desgaste são: *i*/ a dependência com o sistema no qual está inserido e *ii*/ sua manifestação por meio de fenômenos superficiais. Assim, para abordá-lo de forma sistemática e com muita atenção para os fenômenos superficiais a norma DIN 50320 classificou o desgaste de acordo com o tipo de movimento (deslizamento, rolamento, oscilatório e de impacto), estado físico dos corpos que se interagem e os mecanismos que geram o desgaste (adesão, abrasão, reações triboquímicas, fadiga superficial e deformação plástica).⁽³⁾

Apesar de se tratar de um fenômeno de superfície, o substrato também exerce um papel importante, pois é ele que fornece à sustentação a camada superficial do material e prova disso é a importância que ainda é atribuída ao modelo de desgaste de Archard, que estabelece uma relação entre o volume ou massa de material removido durante um período ou uma distância em que permaneceram em contato com movimento relativo (Q), chamada de taxa de desgaste, com três parcelas: a primeira é referente à superfície, expressa por meio da fração do material na qual efetivamente ocorre o contato, também conhecida como constante de desgaste (K); a segunda é referente aos parâmetros operacionais, neste caso (F) é à força normal que atua sobre os corpos e a terceira é a parcela referente a uma propriedade do material, a dureza (H) do material de menor dureza. Esta relação é apresentada pela Equação 1.⁽⁴⁾

$$Q = K \frac{F}{H} \quad \text{Eq. 1.}$$

Com o modelo de Archard observa-se que a taxa de desgaste é inversamente proporcional à dureza e assim se compreende os grandes esforços em aumentar a dureza dos materiais para prevenir o desgaste.

Outro trabalho clássico na literatura sobre desgaste foi aquele realizado por Welsh⁽⁵⁾ que durante o estudo do efeito de um parâmetro do processo, a força normal, observou transições no regime de desgaste, onde em um desses a taxa de desgaste é baixa – regime moderado e no outro a taxa de desgaste é elevada – regime severo de desgaste. Cada um desses regimes pode ser associado a um mecanismo de desgaste e partindo desta hipótese, Lim, Ashby e Brunton⁽⁶⁾ apresentaram um mapa de desgaste, que relaciona parâmetros operacionais, como força normal e velocidade, com os regimes e mecanismos de desgaste.

Outra variável do sistema de desgaste que tem recebido grande atenção nas últimas décadas é a modificação topográfica dos corpos em contato visando obter uma topografia estruturada com relevos uniformes e depressões com geometria regular. Os principais efeitos que estas topografias têm sobre as diversas formas de

manifestação do desgaste estão relacionados com a remoção das partículas do contato, quando em condições de deslizamento a seco, e aprisionamento de lubrificante nos bolsões formados pelas depressões, em condições de deslizamento lubrificado.⁽⁷⁾ Com essas características, as topografias estruturadas têm encontrado aplicação em diversas áreas, a citar alguns trabalhos destinados a indústria de conformação mecânica.⁽⁸⁻¹⁰⁾

Contudo, o comportamento tribológico de superfícies com topografia estruturada varia muito de um sistema de desgaste para outro. Por exemplo, enquanto que alguns estudos mostram que estas topografias podem reduzir o atrito outros apresentam resultados onde não há diferença no comportamento do atrito destas quando comparadas com outras não estruturadas.⁽⁷⁾ Neste contexto insere-se este trabalho, que tem como objetivo verificar a hipótese de que a estrutura dos pontos de contato, seja no formato de linhas ou em rede, tem influência sobre o comportamento de desgaste de superfícies submetidas a condições de deslizamento a seco com elevadas forças de contato.

2 PROCEDIMENTO PARA O ESTUDO EXPERIMENTAL DE SUPERFÍCIES COM TOPOGRAFIA ESTRUTURADA

O procedimento deve ser abordado como o caminho utilizado para atingir um dado objetivo. O primeiro passo no caminho do estudo de superfícies com topografia estruturada é listar todos os elementos e fenômenos presentes no sistema de estudo, que são: combinação dos materiais em contato, combinação das topografias em contato, morfologia do contato, força de contato, tempo de permanência em contato, velocidade relativa, tipo do movimento, meio ambiente e mecanismos de desgaste.

O segundo passo consiste na classificação dos elementos e fenômenos como variáveis de controle ou de resposta. Daqueles elementos e fenômenos listados apenas o mecanismo de desgaste é uma variável de resposta resultante da interação em distintos níveis das variáveis de controle que estão listadas a seguir:

- Combinação dos materiais em contato: 1 nível. Combinação entre um aço ABNT H13 com um aço ABNT 4140.
- Combinação das topografias em contato: 2 níveis. Combinação de uma topografia lixada de forma unidirecional com uma topografia estruturada em linhas e combinação da primeira com outra de topografia estruturada em rede.
- Tempo de permanência em contato: 3 níveis. 2 s, 4 s e 8 segundos.
- Velocidade relativa: 1 nível. $0,05 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Tipo de movimento: 1 nível. Deslizante, sem lubrificação.
- Morfologia do contato: 1 nível. Conforme, típica de superfícies planas.
- Força de contato: 1 nível. 150 N.
- Meio ambiente: 1 nível. Temperatura de 22°C e umidade relativa de 50%.

O terceiro passo descreve a forma na qual essas variáveis foram estudadas em seus diferentes níveis. Para isso foram utilizados um centro de usinagem, um tribômetro do tipo pino-sobre-disco e técnicas de macroscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura com sonda espectroscópica para análise dos mecanismos de desgaste.

O centro de usinagem foi utilizado para produzir as topografias em linha e em rede sobre a superfície de discos obtidos de uma barra de aço ABNT H13 que foram previamente tratados por têmpera seguida de duplo revenimento, conferindo uma dureza média de cinco medidas de $570 \pm 6 \text{ HV}_{0,1}$. Após o tratamento térmico os

discos foram retificados para receber a topografia estruturada. Os parâmetros do fresamento (velocidade e profundidade de corte, penetração de trabalho e avanço por dente) foram obtidos do trabalho de Hioki⁽¹¹⁾ que resultaram nas topografias apresentadas na Figura 1.

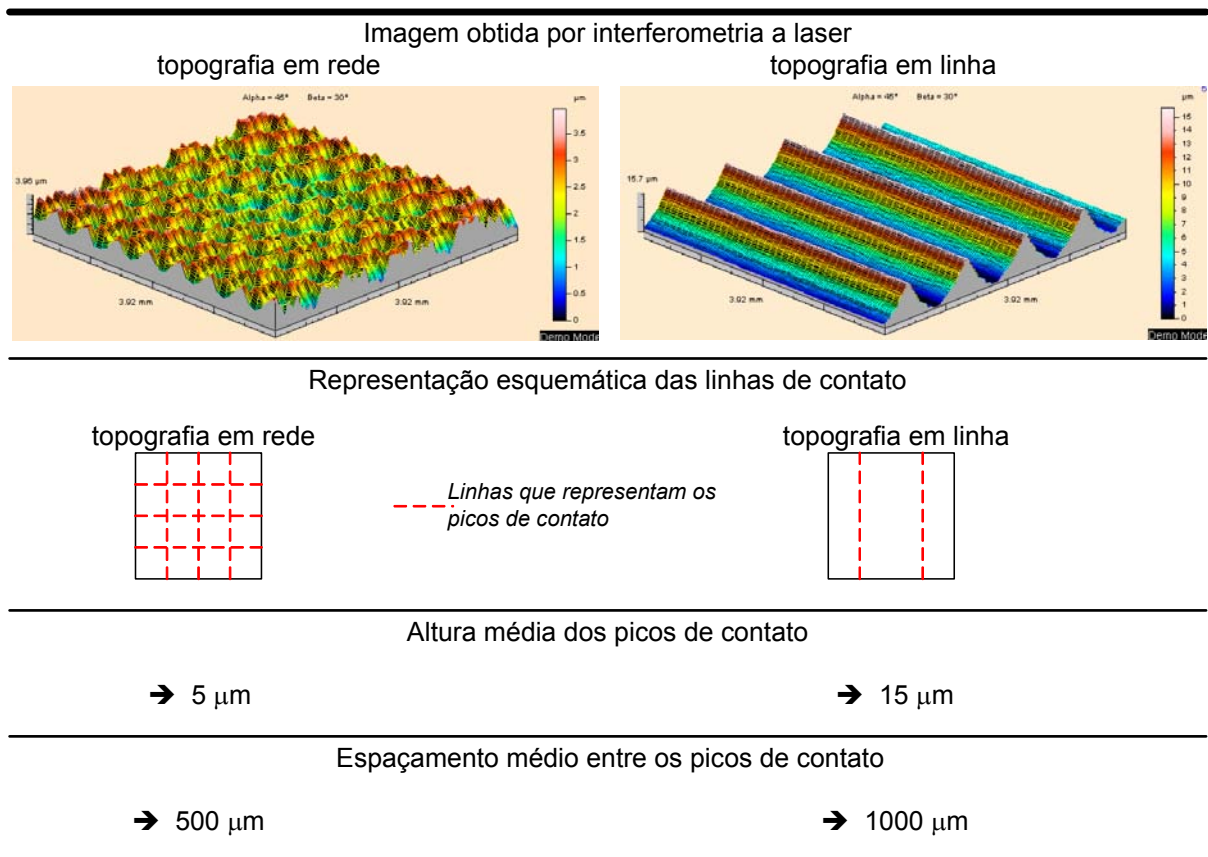


Figura 1. Características das topografias estudadas produzidas conforme Hioki.⁽¹¹⁾

O tribômetro do tipo pino-sobre-disco, da marca Plint modelo TE67, instalado numa sala climatizada, possibilita atender as variáveis de controle listadas anteriormente. Um pino de topo plano, produzido em aço ABNT 4140 com dureza média de 5 medidas de $255 \pm 4 \text{ HV}_{0,1}$, pode ser montado no tribômetro de modo a proporcionar um contato conforme nas condições de força desejada. Além disso, este equipamento possibilita controlar o movimento do disco na velocidade e tempo especificados. A Figura 2 apresenta as dimensões do disco e do pino além de uma representação esquemática desses montados na configuração do ensaio.

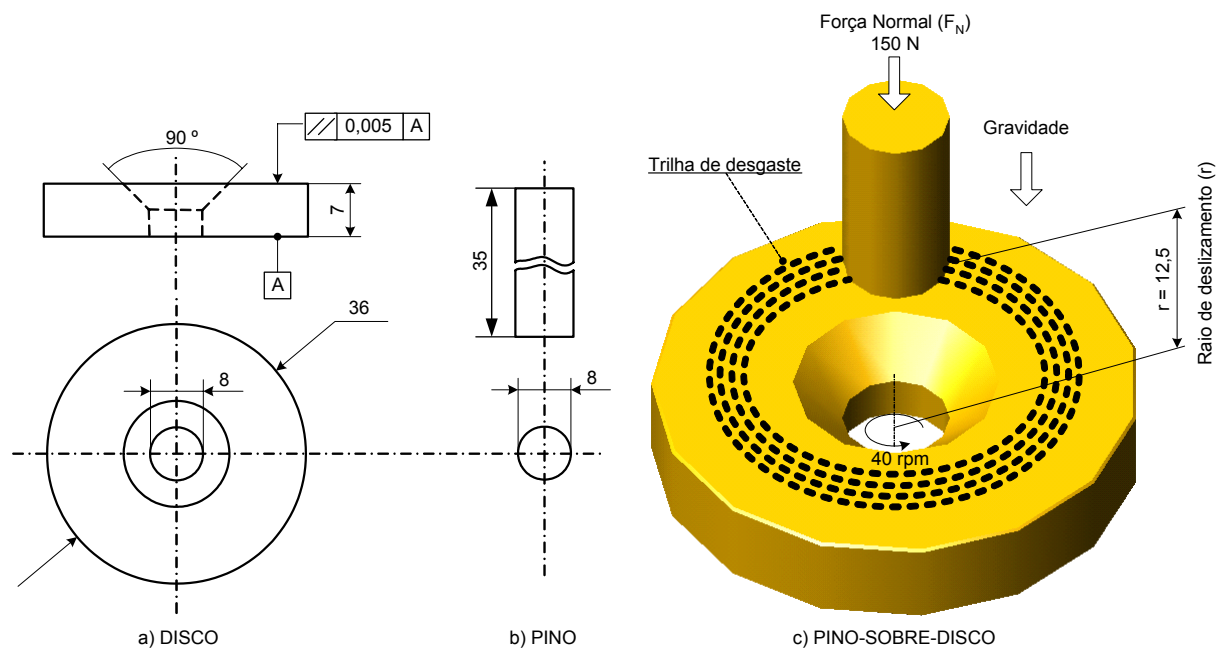


Figura 2. Desenho de fabricação do disco (a), desenho de fabricação do pino (b) e desenho de montagem do pino sobre o disco (c). Todas as dimensões estão em mm.

O quarto passo é destinado à montagem do pino e disco no tribômetro, ambos devem ser montados de forma que suas superfícies estejam paralela uma a outra. A norma ASTM G99,⁽¹²⁾ destinada a ensaios como o descrito, recomenda que o batimento seja inferior a $\pm 1^\circ$. Prieto, Faulkner e Alcock⁽¹³⁾ mostraram que o alinhamento recomendado pela norma pode causar grandes variações nas medidas de desgaste e apresentaram um dispositivo que proporciona um alinhamento com batimento inferior a $\pm 0,5^\circ$, tornando este procedimento menos dependente do operador que irá realizar a montagem. No presente trabalho o disco foi montado com o auxílio de um relógio comparador e obteve-se um batimento no mesmo nível daquele obtido por estes pesquisadores. Além disso, outro procedimento que visa um melhor alinhamento foi preparar a superfície do pino com este já montado no tribômetro e uma lixa colada sobre o disco, garantindo a maior conformidade possível entre as superfícies.

Uma vez que pino e lixa estavam montados no tribômetro, conforme a Figura 2 (c), colocava-se uma carga de 20 N sobre o pino, uma rotação no disco de 380 rpm, velocidade linear de 0,5 m/s, durante 30 segundos. Foram utilizadas lixas com três diferentes granulometrias: # 120, # 220 e # 800 com tamanho médio do grão abrasivo de 140 μm , 66 μm e 12,2 μm , respectivamente.

Os ciclos de lixamento eram repetidos até que todas as marcas decorrentes da lixa anterior tivessem sido removidas. Dessa forma as superfícies dos pinos apresentaram marcas do lixamento em apenas uma direção e que coincidem com a direção de deslizamento. A Figura 3 (a) mostra uma fotografia da superfície do pino e a Figura 3 (b) o perfil topográfico obtido na direção perpendicular a direção de deslizamento, ambas após o lixamento. As Figuras 3 (c) e (d) apresentam os perfis das topografias estruturadas em rede e em linhas, respectivamente, para comparação entre as diferentes morfologias topográficas. Os valores de rugosidade superficial média (Ra) são de 0,2 μm , 1,5 μm e 3,8 μm para o pino, topografia em rede e em linhas respectivamente.

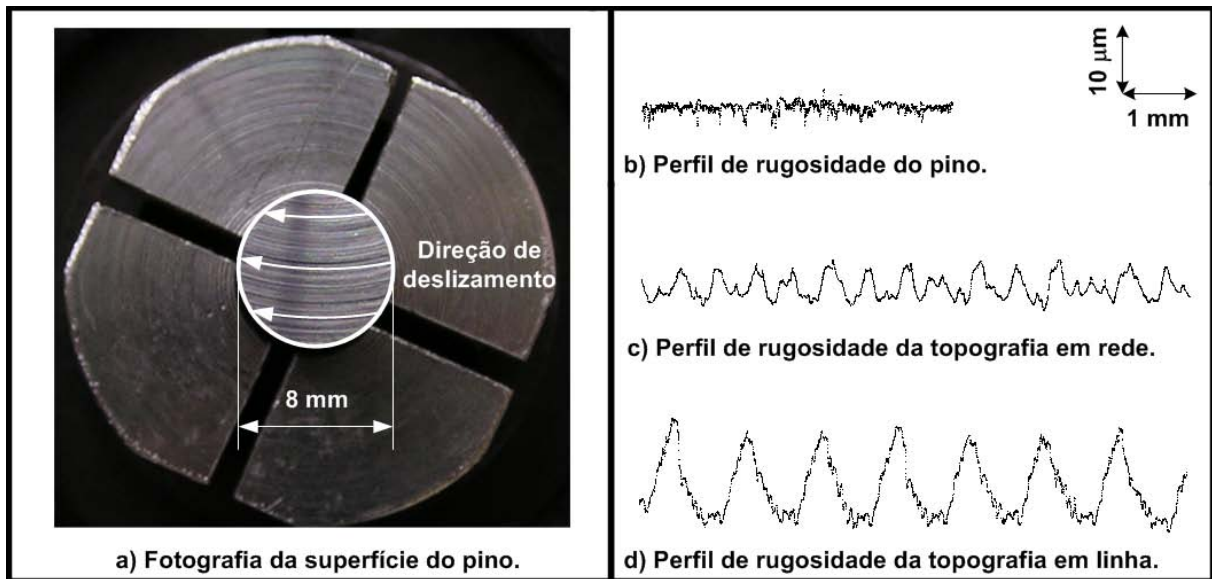


Figura 3. Características topográficas do pino após lixamento.

O quinto passo no estudo do comportamento tribológico de superfícies com topografia estruturada é verificar o efeito da variável tempo de ensaio mantendo as demais variáveis fixas conforme apresentado anteriormente. Nesta etapa considera-se importante verificar separadamente cada uma das variáveis de controle (combinação das topografias e tempo de permanência em contato). A variável tempo de ensaio será avaliada mantendo fixa a combinação topográfica conforme apresentado esquematicamente na Figura 4.

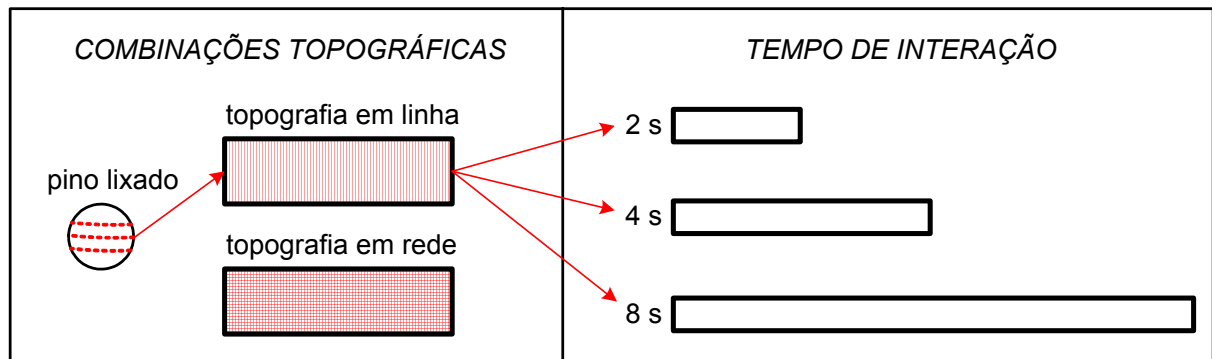


Figura 4. Representação esquemática das variáveis de controle com foco no efeito do tempo.

As modificações superficiais dos discos com topografia em linha em função do tempo estão apresentadas na Figura 5.

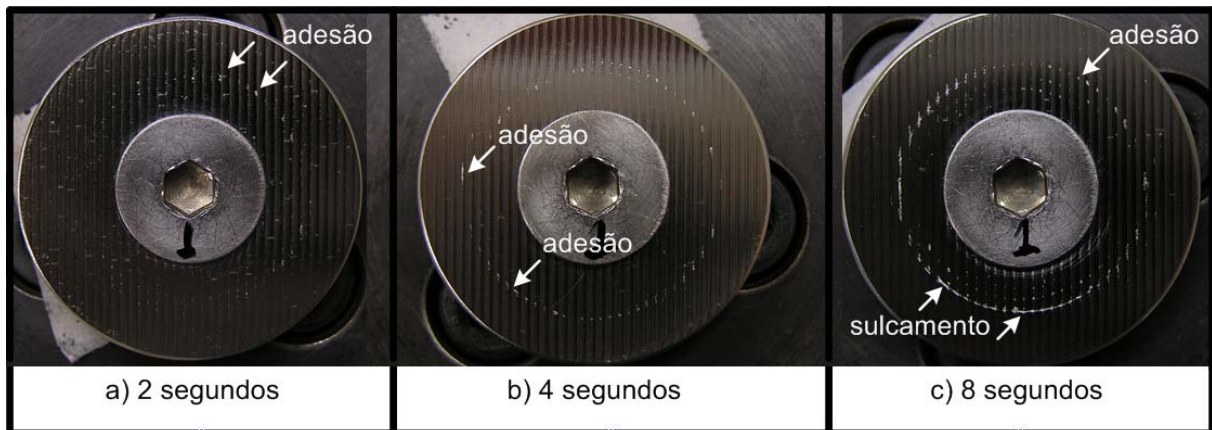


Figura 5. Modificações superficiais em discos com topografia em linha após 2 segundos (a), 4 segundos (b) e 8 segundos (c) de deslizamento.

A Figura 5 mostra que o disco que permaneceu em contato deslizante por 8 segundos sofreu a maior alteração superficial, seguido pelo disco que deslizou 4 segundos. As indicações pelas setas de adesão e sulcamento correspondem aos mecanismos de desgaste sendo que o último foi identificado apenas no disco que sofreu deslizamento por 8 segundos. A Figura 6 mostra com maior aumento o dano do tipo sulcamento.

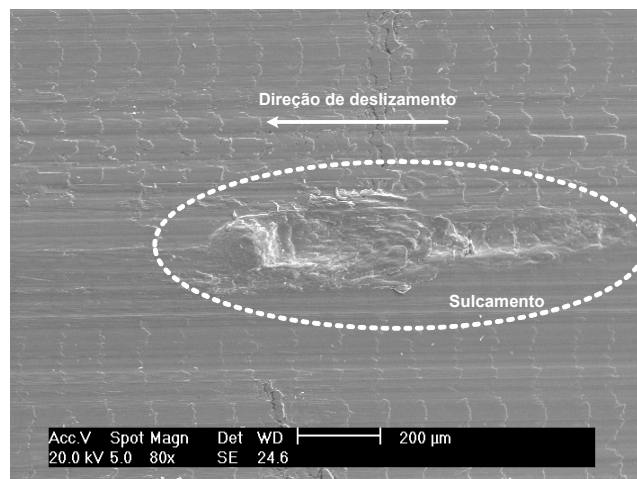


Figura 6. Dano superficial típico de sulcamento. Topografia em rede após 8 segundos de deslizamento.

Estas observações podem sugerir uma transição no mecanismo de desgaste, um período inicial onde há apenas adesão e outro com adesão e sulcamento. Porém há outros fatores a serem considerados e um deles é à distância de deslizamento. Como a velocidade foi mantida constante a distância de deslizamento aumentou proporcionalmente com o tempo. Durante a distância percorrida em cada um dos tempos a superfície do disco foi modificada, como apresentado, assim como a superfície do pino.

O emprego do mesmo pino por 8 segundos resultou no fenômeno de sulcamento do disco, o corpo mais duro deste tribossistema. Para que isto seja possível é necessário que os debrís do material mais mole encruem significativamente (resultando em abrasão a três corpos) ou que as regiões do material mais mole das quais os debrís foram arrancados encruem significativamente para valores de dureza superiores aos do material mais duro (resultando em abrasão a dois corpos). Nos

dois casos o dano superficial resultante é o sulcamento do material mais duro, como apresentado na Figura 6.

Para separar o efeito da modificação topográfica do pino, este teve sua superfície lixada após 2 segundos de deslizamento para novamente deslizar por mais 2 segundos sobre o mesmo disco. Este procedimento foi repetido por 4 vezes, o que corresponde a mesma distância do disco que deslizou por 8 segundos contra um único pino ininterruptamente. A Figura 7 apresenta de forma esquemática o ensaio para verificar o efeito da modificação da superfície do pino e também a superfície do disco após 8 segundos interrompidos a cada 2 segundos para lixar o pino.

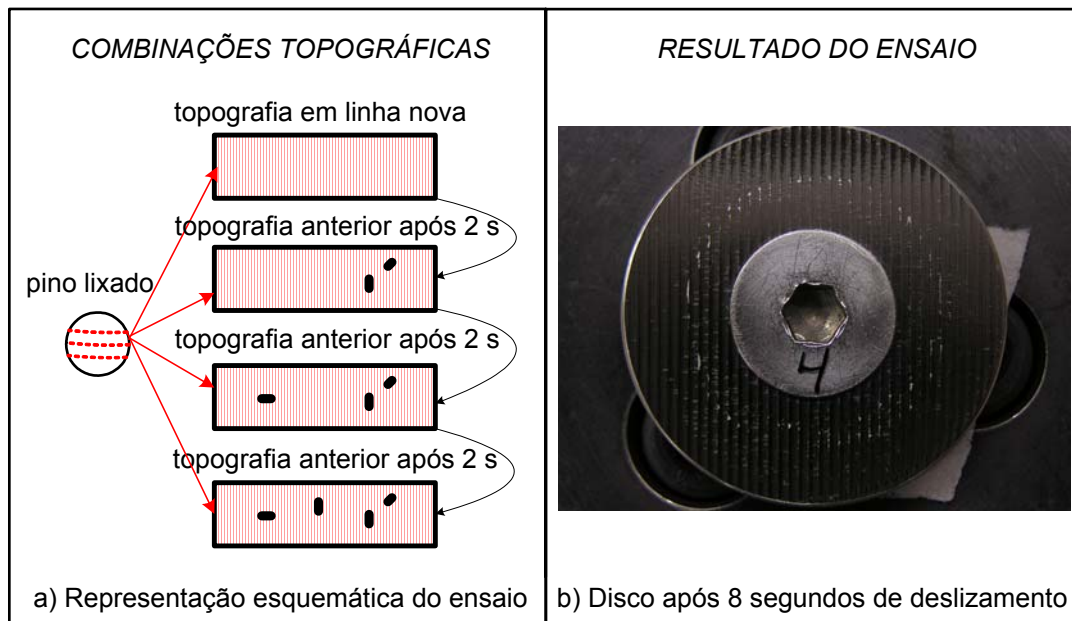


Figura 7. Teste para verificar o efeito da alteração da superfície do pino.

A Figura 7 (b) mostra que houve uma intensificação do mecanismo de adesão quando comparada com a superfície do disco que deslizou por 2 segundos, ver Figura 5 (a). Dessa forma conclui-se que a adesão aumentou com o somatório de deslizamentos sucessivos de um disco com topografia estruturada em linhas contra pinos de superfície lixada.

Ainda com estes testes conclui-se também que os danos causados na superfície do pino são responsáveis por alterar o mecanismo de desgaste, de somente adesão para adesão mais sulcamento, comparar a Figura 7 (b) com a Figura 5 (c). Contudo, não se pode demonstrar inequivocadamente a origem do sulcamento, se é devido as partículas de desgaste do pino ou das modificações topográficas sofridas pelo pino, pois no mesmo tempo em que a superfície do pino foi lixada a superfície do disco foi limpa, removendo eventuais partículas do contato. Entretanto a Figura 6 sugere que os sulcos são produzidos por partículas de desgaste que foram arrastadas contra o disco. A grande diferença de durezas entre pino e disco ($255 \text{ HV}_{0,1} \times 570 \text{ HV}_{0,1}$) bem como a observação de sulcos com apenas 8 segundos de ensaio sugere que seja partículas de desgaste do pino. Neste caso a interpretação do fenômeno considerando o modelo de Archard significaria, que houve alteração na constante de desgaste K da Equação 1.

Observações visuais não identificaram partículas soltas sobre a superfície do disco. Medições da massa do pino antes e após o deslizamento não apresentaram variações, considerando uma balança com precisão de $1 \cdot 10^{-4} \text{ g}$. A única evidência

da modificação superficial do pino após 2 segundos de deslizamento está no perfil de rugosidade, apresentado na Figura 8 (b).

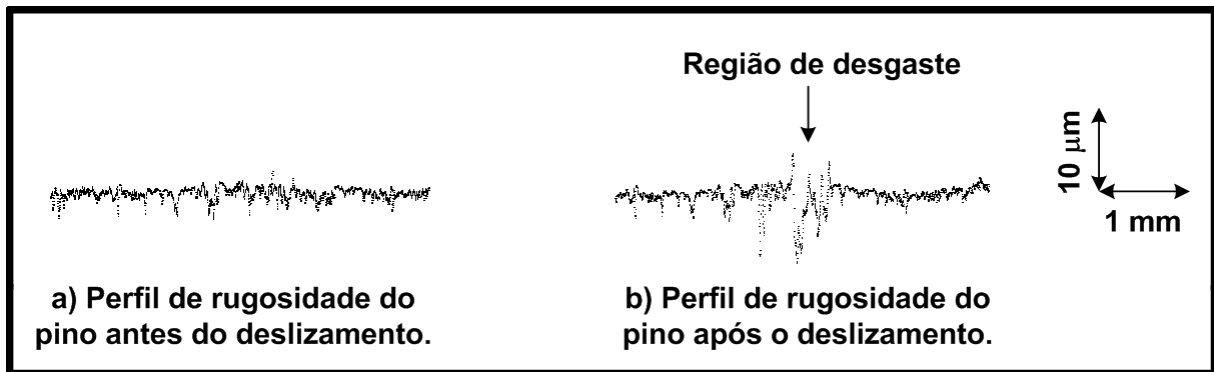


Figura 8. Modificação no perfil de rugosidade do pino após 2 segundos de deslizamento.

O procedimento proposto e descrito até aqui consistiu na descrição e detalhamento das variáveis do sistema de estudo (passos 1 e 2), a forma na qual estas foram abordadas (passos 3 e 4) e as constatações experimentais únicas do sistema (quinto passo). O sexto e último passo é apresentar as condições experimentais que comparam o comportamento tribológico de cada uma das duas topografias estruturadas, onde a única variável é a combinação topográfica. Para isso, optou-se pela condição experimental na qual um único disco, desliza contra um pino lixado por 80 vezes em ciclos de 2 segundos, com interrupção para lixar a superfície do pino e limpar a superfície do disco e pino com jato de ar e papel embebido em álcool, conforme representação esquemática apresentada na Figura 9.

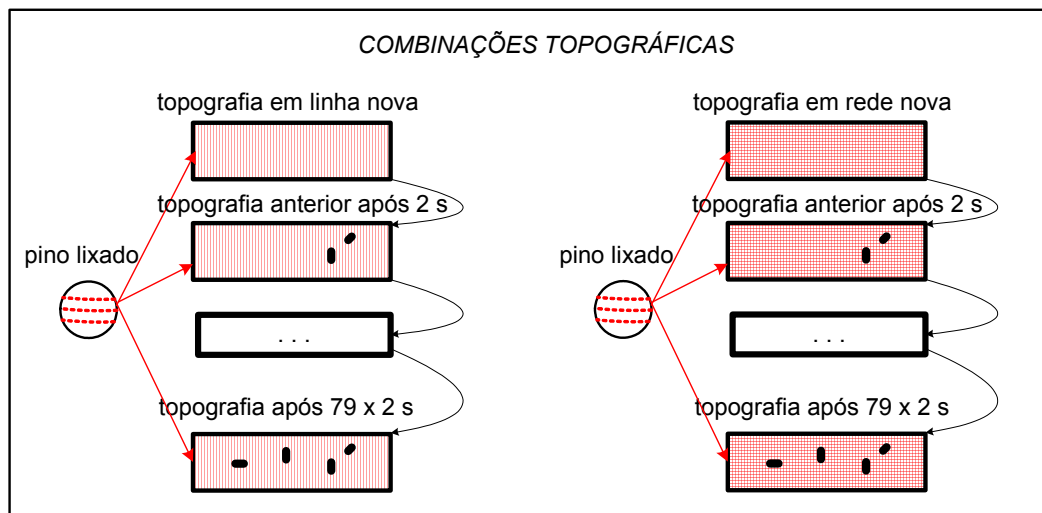


Figura 9. Representação esquemática do ensaio experimental para avaliação das topografias estruturadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 10 apresenta as modificações topográficas dos discos com o decorrer dos ensaios. Os números marcados no parafuso que fixa o disco correspondem a quantidade de pinos que deslizou sobre este. Observa-se que a evolução dos danos superficiais ocorre de forma gradual, intensificada durante os ciclos de deslizamento e independente da topografia em estudo.

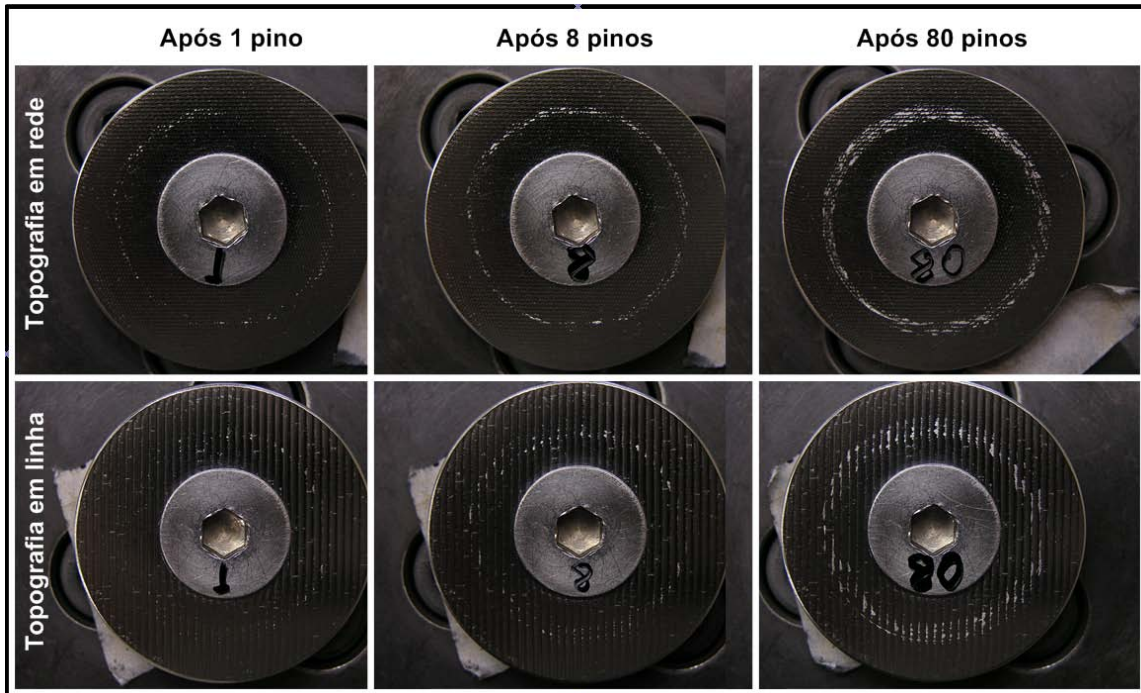


Figura 10. Evolução dos danos promovidos nas topografias de estudo durante os ciclos de deslizamento.

As condições de ensaio (alta carga, baixa velocidade de deslizamento e ausência de lubrificação) apontam para um regime de desgaste severo, conforme os mapas de desgaste de Lim e colaboradores⁽⁶⁾. Nestas condições a interação entre pino e disco é intensa, constante e não há a presença de uma camada de óxido na região circunvizinha a cada uma das partículas aderidas na interface do contato. As modificações superficiais apresentadas na Figura 9 são características de superfícies que sofreram desgaste em regime severo, isto pelo fato de que os danos são típicos de adesão.

O fato que suporta a afirmação sobre a adesão de partículas do pino sobre o disco é a análise qualitativa dos elementos químicos destes por EDS (Energy Dispersive System) de três regiões de interesse: a) no disco, fora da trilha de desgaste; b) no disco, sobre uma partícula aderida e c) no pino. A Figura 11 apresenta os gráficos de intensidade de energia absorvida nos comprimentos de onda referentes aos elementos comuns a cada uma das amostras.

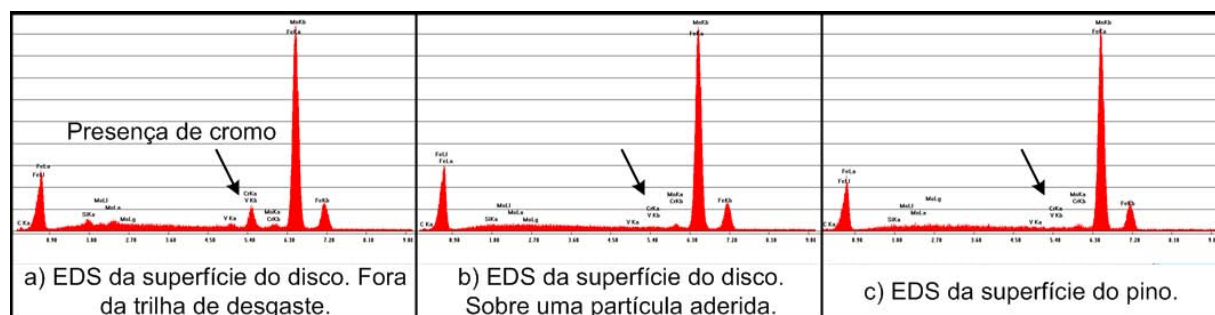


Figura 11. Análise qualitativa dos elementos químicos presentes no disco (a), no disco, sobre uma partícula aderida (b) e na superfície do pino.

A comparação entre os gráficos da Figura 11 permite concluir que são materiais com composição química diferentes, evidenciados pela presença de Cromo no gráfico referente a amostra do disco (a). Por outro lado, não se observa diferença significativa entre os gráficos correspondentes a partícula aderida (b) com aquele do pino (b), comprovando o fato da adesão do material do pino no disco.

Os principais modelos propostos para os mecanismos de desgaste por deslizamento (Archard;⁽⁴⁾ Kayaba, 1979 e Sasada, 1984 apud Hutchings⁽¹⁴⁾) consideram que as interações entre os corpos ocorrem nos picos das asperezas e que destas interações há o desprendimento de uma partícula preferencialmente do corpo de menor dureza, podendo esta permanecer aderida ao corpo de maior dureza. A Figura 12 apresenta com detalhe uma região da trilha de desgaste das topografias estudadas com indicações das partículas de adesão nos pontos de contato.

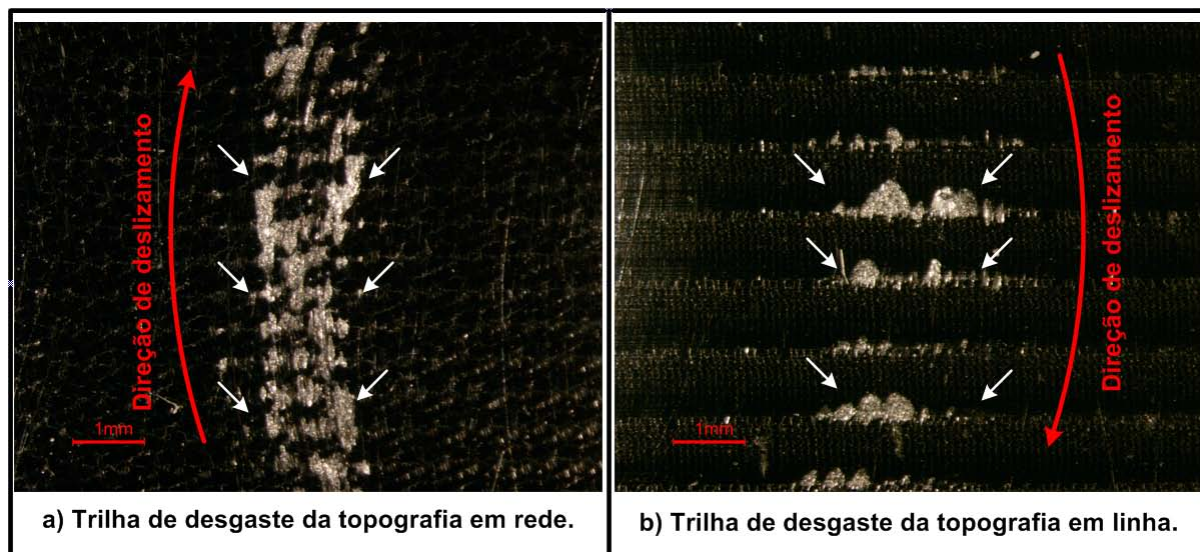


Figura 12. Superfície dos discos apresentando partículas de adesão oriundas do pino, indicadas pelas setas.

As regiões claras sobre a superfície dos discos, indicadas pelas setas, correspondem às partículas aderidas (resultado da adesão – colamento – soldagem entre os picos topográficos do disco com aqueles do pino que por sua vez, permanece enquanto partículas – debris – aderido na região de contato original do disco). As áreas correspondentes as partículas aderidas foram quantificadas, com o auxílio de um microcomputador e um aplicativo analisador de imagens. Foram observadas 4 regiões que continham a trilha de desgaste com aumento de 20 vezes, equidistantes de 90°. A topografia em rede apresentou uma área de partículas aderidas com variação entre 17% e 21% enquanto que para a topografia em linha a variação foi de 12% a 14%.

A maior área correspondente as partículas aderidas nos discos com topografia em rede se deve a sua maior densidade de picos. Por outro lado, a topografia em linha possui uma anisotropia que dependendo da posição das linhas de contato com a direção de deslizamento a área das partículas aderidas diminui. A influência da orientação das asperezas de contato havia sido descrita por Shafia e Eyre.⁽¹⁵⁾ Estes pesquisadores mostraram que durante ensaios de desgaste de deslizamento com movimento linear e alternado, corpo e contra-corpo em aço, carga normal de 49 N, velocidade de 0,1 m/s e sem lubrificação, as amostras com asperezas orientadas numa única direção e paralelas a direção de deslizamento apresentaram perda de

massa menor quando comparadas aquelas com asperezas orientadas e perpendiculares a direção de deslizamento.

4 CONCLUSÃO

O estudo realizado permitiu diferenciar o desempenho de superfícies com topografia estruturada em condições de desgaste por deslizamento a seco. Nestas condições a topografia caracterizada por apresentar linhas paralelas de contato, apresentou danos superficiais relacionados com adesão em quantidades menores aquelas da topografia em rede.

Outro ponto a destacar neste trabalho foi o desenvolvimento de um procedimento que possibilitou acompanhar todo o processo de modificação topográfica de forma repetitiva durante o ensaio no que se refere ao fenômeno da adesão.

O emprego de pinos com superfícies lixadas a cada 2 segundos de deslizamento resultou na supressão do fenômeno de sulcamento do disco, o corpo mais duro. Do ponto de vista da modelagem do fenômeno de desgaste isto significa, considerando o modelo de Archard, que houve alteração na constante de desgaste K.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de doutorado de acordo com o processo número 142812/2006-4 e ao banco Santander pelo apoio financeiro recebido no âmbito do Programa de Mobilidade Internacional Santander / Banespa – 2007. À Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Mecânica, Portugal.

REFERÊNCIAS

- 1 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Friction, Lubrication and Wear Technology. In: Metals Handbook, Vol. 18. 1992. p. 942.
- 2 JOST, H.P. Tribology – origin and future. Wear, 136, 1990. p. 1-17.
- 3 ZUM GAHR, K. H. Microstructure and wear of materials. Elsevier, 1987.
- 4 ARCHARD, J.F., Contact and Rubbing of Flat Surfaces. J. Appl. Phys. 241, 1953, p. 891-988.
- 5 WELSH, N.C. The dry wear of steels: I and II. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.. A257, 1965, p. 31-72.
- 6 LIM, S.C.; ASHBY, M.F.; BRUNTON, J.H. Wear-Rate transitions and their relationship to wear mechanisms. Acta Metallurgica. Vol. 35, 1987, p. 1343-1348.
- 7 COSTA, H.L.; HUTCHINGS, I.M. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. Tribology. Vol. 40, 2007, p. 1227-1238.
- 8 ASPINWALL, D.K.; WISE, M.L.H; STOUT, K.J.; GOH, T.H.A; ZHAO, F.L.; ELMENSHAWY, M.F. Electrical discharg texturing. Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 32, 1992, p. 183-193.

- 9 PAWELSKI, O.; RASP, W.; ZWICK, W.; NETTELBECK, H.J.; STEINHOFF, K. The influence of different work-roll texturing systems on the development of surface structure in the temper rolling process of steel sheet used in the automotive industry. *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 45, 1994, p. 215-222.
- 10 STEINHOFF k.; RASP, W.; PAWELSKI, O. Development of deterministic-stochastic surface to improve the tribological conditions of sheet forming processes. *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 60, 1996, p. 355-361.
- 11 HIOKI, D. Influencia dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006, p. 232.
- 12 STM STANDARD DESIGNATION G99 – 95a (reapproved 2000). Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus, p. 6.
- 13 PRIETO, I.G.; FAULKNER, M.D.; ALCOCK, J.R. The influence of specimen misalignment on wear in conforming pin on disk tests. *Wear.* Vol. 257, 2004, p. 157-166.
- 14 HUTCHINGS, I.M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.* 1.ed. London: Edward Arnold, 1992.
- 15 SHAFIA, M.A.; EYRE, T.S. The effect of surface topography on the wear of steel. *Wear.* Vol. 61, 1980, p. 87-100.