

DESGASTE E ATRITO DA CAMADA NITRETADA DO AÇO ABNT H13 NITRETADO POR PLASMA PULSADO

Mario Vitor Leite ¹

Carlos Alejandro Figueroa ²

Israel Jacob Rabin Baumvol ³

Rodrigo Leonardo de Oliveira Basso ⁴

Paulo Roberto Mei ⁵

Amilton Sinatora ⁶

Resumo

Discos de aço ABNT H13 foram nitretados por plasma pulsado numa atmosfera 20% N₂ e 80% H₂, à temperatura de 400°C em diferentes tempos: 1 h, 4 h, 9 h, 16 h e 36 h. Estes discos foram testados num tribômetro para simular o desgaste por deslizamento. Para isto, foi utilizada uma esfera de Si₃N₄ de 7,14 mm de diâmetro e carga normal aplicada de 800 N. O disco deslizou sob a esfera sem a presença de um lubrificante por 8 h, à velocidade de 0,05 ms⁻¹, totalizando uma distância de deslizamento de 1.440 m. Os resultados deste ensaio mostram que, quanto maior o tempo de nitretação, menor o volume de material desgastado. Os mecanismos de desgaste observados são: deformação plástica, sulcamento e lascamento e estão relacionados com as características microestruturais da camada nitretada. O coeficiente de atrito medido é de 0,2 para todas as condições testadas.

Palavras-chave: Nitretação por plasma; Desgaste por deslizamento; Atrito.

WEAR AND FRICTION OF THE NITRIDED LAYER OF AN ABNT H13 TOOL STEEL NITRIDED BY PULSED PLASMA

Abstract

ABNT H13 tool steel discs were nitrided by pulsed plasma in an atmosphere 20% N₂ and 80% H₂ at a temperature of 400°C in different times: 1 h, 4 h, 9 h, 16 h and 36 h. The discs were tested in a tribometer in order to study the sliding wear of the nitrided material. A sphere of Si₃N₄ with a diameter of 7.14 mm was used. A normal load of 800 N was applied. The discs slid under the sphere without lubricant for 8 h at a sliding speed of 0.05 ms⁻¹ up to reach a total distance of 1.440 m. The results show that longer nitriding times reduce the volume of wear. The following wear mechanisms are observed: plastic deformation, ploughing and spalling. These mechanisms are correlated to the microstructure of the nitrided layer. The friction coefficient is 0.2 for all tested conditions.

Key words: Plasma nitriding; Sliding; Friction.

1 INTRODUÇÃO

Uma rápida pesquisa pelos dicionários da Língua Portuguesa sobre a palavra “desgastar” resulta nas seguintes expressões: *gastar aos poucos*; *gastar pelo uso*. Todas compartilham a visão de que, se o componente (des)gasta, há perda. As estimativas de perdas devidas ao desgaste no Brasil, considerando o PNB

em 2004 de 1,7 trilhões de reais, estão entre 17 bilhões (1%) a 104 bilhões (6%) de reais naquele ano.⁽¹⁾ O conhecimento disponível para reduzir estas perdas em aproximadamente 20% está consolidado numa ciência relativamente nova que estuda a interação entre corpos com movimento relativo, a Tribologia.

¹M.Eng. Doutorando do Laboratório de Fenômenos de Superfície da EPUSP. Av. Professor Mello Moraes, 2231, Cep 05508-900, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: mvleite@usp.br, www.lfs.usp.br.

²Dr. Professor do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul. Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, Cep 95070-560, Caxias do Sul, RS, Brasil. E-mail: cfiguer@ucs.br.

³Dr. Professor do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul, Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, Cep 95070-560, Caxias do Sul, RS, Brasil. E-mail: ijrbaumv@ucs.br

⁴Dr. Professor do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul. Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, Cep 95070-560, Caxias do Sul, RS, Brasil. E-mail: bassanico@gmail.com.

⁵Dr. Professor do Departamento de Engenharia de Materiais – DEMA da Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM da UNICAMP. Rua Mendeleiev, s/n, CP 6122, Cep: 13083-970, Campinas, SP, Brasil. E-mail: pmei@fem.unicamp.br.

⁶Dr. Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP. Av. Professor Mello Moraes, 2231, Cep 05508-900, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: sinatora@usp.br.

A palavra tribologia, do grego *tribos* (τριβος) que significa roçar-esfregar, foi enunciada pela primeira vez pelo 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⁾

Um dos grandes desafios na resolução dos problemas de desgaste é antecipar a forma e a intensidade com a qual ele irá ocorrer em um dado componente.⁽³⁾ Conhecer a intensidade do fenômeno permite aos engenheiros verificar se o componente poderá atingir a vida útil que se espera para o mesmo. Conhecer a forma que ocorre o desgaste permite escolher adequadamente o material para cada aplicação uma vez que o fenômeno de desgaste depende não apenas do material como do sistema no qual ele ocorre. Para se conhecer a forma pela qual o desgaste ocorre é importante conhecer dois aspectos do problema. Um é o tipo principal de movimento que causa desgaste, como se vê na norma DIN 50320, ou seja: o deslizamento, o rolamento, o movimento oscilatório e o de impacto. O segundo aspecto a ser considerado são os mecanismos de desgaste, que são: a adesão (seguida de deformação plástica e ruptura das junções entre corpos), a abrasão, as reações triboquímicas e a fadiga superficial.⁽⁴⁾

Estas considerações, talvez por não resultarem num modelo matemático, não foram incorporadas ao modelo mais conhecido, que descreve o desgaste num sistema no qual um corpo desliza sobre outro, que é o modelo de Archard, representado pela Equação I. Nesta equação, o volume ou massa de material (Q) removido durante um período ou uma distância está relacionado à constante de desgaste (K); à força normal que atua sobre os corpos (F) e à dureza (H) do material mais mole do par em contato:⁽⁵⁾

$$Q = K \frac{F}{H} \quad (1)$$

Compreensivelmente, são feitas muitas tentativas para se endurecer os componentes ou suas superfícies visando reduzir o seu desgaste. Outro raciocínio, menos associado ao modelo, é o de minimizar a atuação de mecanismos que tenham origem química como a adesão ou a reação triboquímica.

A nitretação promove o endurecimento⁽⁶⁾ e, ao mesmo tempo, interpõe entre os corpos em movimento uma camada de natureza química diferente de ambos, que possivelmente funcionará minimizando o mecanismo de adesão, um dos mais severos no que se refere à perda de massa. Em função disto, há numerosos estudos sobre os benefícios que a nitretação a plasma oferece para os materiais e, em particular, aos materiais para ferramentas, componentes frequentemente sujeitos ao contato metal-metal em condições de deslizamento.^(7,8) Em paralelo, muitos pesquisadores têm se dedicado ao estudo do atrito decorrente dessas camadas, uma vez que elevados (ou não repetitivos) coeficientes de atrito podem frequentemente limitar o emprego de um tratamento de nitretação.⁽⁹⁾

A análise da bibliografia revela que os trabalhos experimentais que visam diminuir o desgaste por meio da nitretação se sucedem ano após ano sem evidenciar, por um lado, progressos na diminuição do desgaste e, por outro, insucessos frequentes na obtenção de coeficientes de atrito baixos ou, ao menos reproduzíveis. Por esta razão, o objetivo deste trabalho é investigar como evoluem os mecanismos de dano durante o desgaste a seco da camada nitretada do aço ABNT H13 e correlacioná-los, bem como as condições de ensaio tribológico, aos valores de desgaste e de coeficientes de atrito.

2 DETALHAMENTO EXPERIMENTAL E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

O estudo da relação entre microestrutura e a resistência ao desgaste foi realizado no aço ABNT H13, temperado a partir de uma temperatura de austenitização de 1.030°C e duplamente revenido a 580°C por 2 h. A dureza resultante desse tratamento térmico é de $570 \pm 6 \text{ HV}_{0,1}$.

Os corpos-de-prova têm o formato de disco com 36,0 mm de diâmetro e 7,0 mm de espessura. O tratamento de nitretação foi realizado por plasma com uma atmosfera de composição 20% de N₂ e 80% de H₂, à temperatura de 400°C em diferentes tempos: 1 h, 4 h, 9 h, 16 h e 36 h.

Foram retiradas amostras do material nitretado para análise microestrutural. Para isso foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Shimadzu, modelo SM – 550, com sonda para análise química.

Os ensaios de desgaste foram realizados num tribômetro da marca Plint®, modelo TE67, na configuração esfera sobre disco. A condição de deslizamento foi única para todos os discos nitretados em diferentes tempos.

Durante o deslizamento, o disco nitretado gira no sentido anti-horário a 40 RPM em contato com uma esfera de Si₃N₄, com 7,14 mm de diâmetro e carga normal aplicada de 800 N. O período de deslizamento foi de 8 h e a distância percorrida, com velocidade de 0,05 ms⁻¹, foi de 1.440 m.

A cada hora de deslizamento media-se a massa do disco e traçava-se o perfil topográfico da região correspondente à trilha de desgaste. Porém, antes de realizar este procedimento, o

disco era limpo em banho ultrassônico enquanto que a esfera, além de limpa, era girada para que ao iniciar um novo período de deslizamento, para o contato fosse feito sempre com uma superfície nova da esfera.

O deslizamento foi a seco num ambiente com temperatura média de $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa (UR) de $50\% \pm 10\%$.

Foi utilizado um disco de feltro de uma poltriz manual, que girava a 2.000 RPM, para remover as partículas de desgaste que surgiam na trilha no decorrer do deslizamento.

O tribômetro utilizado possibilita medir a força tangente às superfícies em contato e na direção do deslizamento, resultante do esfregamento entre os corpos. Neste trabalho, esta força tangente ao deslizamento, aquela que oferece resistência ao movimento, é chamada de força de esfregamento (F_e) e pelo resultado da divisão de F_e pela força normal (F_n), conforme a primeira Lei do Atrito, obtém-se o coeficiente de atrito (μ) no esfregamento.⁽¹⁰⁾

A variação de massa sofrida pelo disco foi medida em uma balança com resolução de 0,1 mg. A caracterização dos mecanismos de desgaste foi realizada em um microscópio óptico na superfície da trilha de desgaste.

A perfilometria foi obtida com um perfilômetro de contato da marca Kosaka®, modelo Sufcorder I.700 α , que utiliza uma ponta cônica de diamante com raio igual a 2,0 μm . A amplitude máxima de medição no eixo vertical do perfil é de 800 μm com resolução de 0,05 μm . Os perfis topográficos foram obtidos sempre numa mesma região antes e após cada hora de deslizamento.

A sobreposição dos perfis topográficos, antes e após o deslizamento, resulta numa área abaixo do perfil inicial, que é considerada como a área da trilha de desgaste (A_{td}). O volume da trilha de desgaste (V_{td}) é determinado considerando que a área (A_{td}) é constante em todo o perímetro da trilha com a seguinte expressão:

$$(V_{td} = 2\pi r A_{td}), \quad (2)$$

onde r é o raio de deslizamento, igual a 12,5 mm.

É utilizada a seguinte nomenclatura para os materiais estudados: 1 h, 4 h, 9 h, 16 h e 36 h, representando os discos com seus respectivos tempos de nitretação. O disco sem nitretação é designado por SN.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização das Amostras Nitretadas

A espessura das camadas nitretadas foi medida por meio das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura. Para os tempos de nitretação estudados - 1 h, 4 h, 9 h, 16 h e 36 h - foram encontradas as seguintes espessuras da camada nitretada (camada de compostos + camada de difusão), respectivamente: 10 μm , 20 μm , 40 μm , 50 μm e 80 μm . A Figura 1 apresenta, como exemplo de uma microestrutura do aço H13 após nitretação por plasma pulsado, uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da amostra 16 h. A linha tracejada representa a região de transição entre a camada nitretada e a matriz revenida.

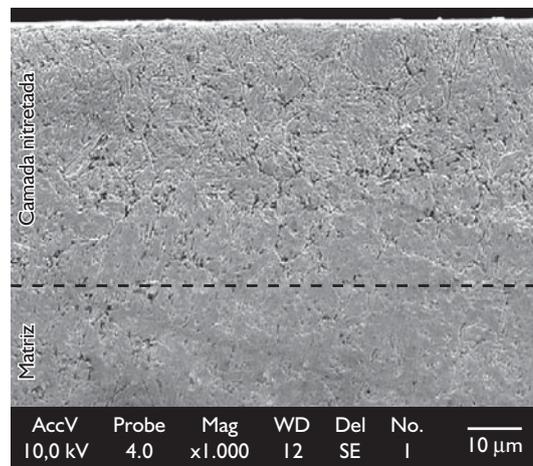


Figura 1. Seção transversal da amostra 16 h após ataque químico com reagente Nital 5%.

3.2 Ensaio de Desgaste

Medir a quantidade de material removido pela diferença de massa do disco antes e depois do deslizamento não possibilita classificar os materiais, isto porque mesmo após 8 h, ou 1.440 m de deslizamento, o disco que apresentou maior redução de massa foi o (1 h) com $2,2 \pm 0,5$ mg e aquele que perdeu menos massa foi o (16 h) com $1,1 \pm 0,5$ mg. O emprego de uma balança com resolução máxima de 0,1 mg com medições a cada hora de deslizamento resultou em valores medidos próximos a sua sensibilidade. Desta forma, como a massa total removida é a soma das diferenças de massa a cada hora de deslizamento, o erro da medição é propagado para o valor final, resultando em determinações não confiáveis de perda de massa.

Porém, há outra forma de quantificar o desgaste, medindo o volume (V_{td}), que corresponde ao material que removido ou o resultado da sua soma com o material deslocado para as bordas da trilha de desgaste. Na Figura 2 tem-se a variação do volume (V_{td}) com a distância de deslizamento para os diferentes tempos de nitretação.

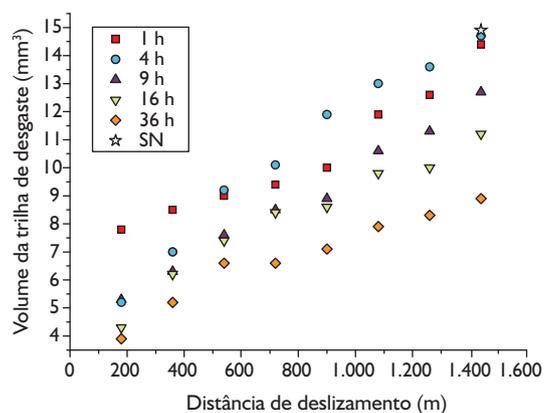


Figura 2. Variação do volume da trilha de desgaste (V_{td}) em função da distância de deslizamento.

Descreve-se, a seguir, a tendência geral do desempenho das amostras em função do tempo de deslizamento no ensaio de desgaste:

- *2 h de deslizamento (360 m)*: após duas horas de deslizamento observa-se que a amostra 1 h sofre maior desgaste, enquanto que as demais, com maiores profundidades de nitretação, resistem mais à ação da esfera. Não é possível discernir com mais detalhe o efeito dos tempos de nitretação uma vez que as perdas de volume das amostras se sobrepõem parcialmente.
- *3 h de deslizamento (540 m)*: A região nitretada no tratamento por quatro horas não é mais capaz de proteger o substrato de modo que as amostras 1 h e 4 h apresentam, a partir desta distância de ensaio, as maiores perdas de massa. As amostras 9 h e 16 h passam a ter a mesma resistência ao desgaste. Entretanto, ainda não se pode discernir claramente o efeito da espessura de nitretação.
- *6 h de deslizamento (1.080 m)*: Somente após 1.080 m de deslizamento foi possível diferenciar a resistência ao desgaste entre as amostras 9 h e 16 h. A maior profundidade de nitretação comanda, desta distância em diante, e inequivocamente, a resistência ao desgaste até o final da oitava hora de deslizamento.
- Após 8 h de deslizamento as amostras nitretadas por 1 h e 4 h apresentam o mesmo volume de desgaste da amostra sem nitretação (SN) indicando que a profundidade de desgaste atingiu o material base.

Observa-se na Figura 3 que o lascamento é um mecanismo que atua nas amostras nitretadas com tempo superior a 4 h. Sun, Bell e Wood⁽¹¹⁾ estudam o comportamento de desgaste do aço inoxidável mart ensítico nitretado por plasma e consideram que o lascamento

ocorre por delaminação de Suh⁽¹²⁾ (formação de trincas superficiais e subsuperficiais, propagação e surgimento de partículas de desgaste). Essa descrição, embora coerente com solicitações de desgaste repetidas,⁽¹³⁾ parece não se aplicar à descrição dos danos observados neste trabalho uma vez que não se observam lâminas como as descritas por Suh e muitas das trincas parecem se nuclear e se propagar sem a interferência dos produtos de desgaste. A relação entre o lascamento com o tempo de nitretação pode ser abordada partindo do fato que as camadas nitretadas são frágeis, devido à precipitação de nitretos nos contornos de grão.⁽¹¹⁾

Na amostra 1 h não há formação da camada de compostos. A formação da camada de compostos coincide com a presença de trincas superficiais. Na amostra 4 h esta camada é descontínua e inferior a 1 μm . Com 9 h, 16 h e 36 h a camada de compostos atinge uma espessura de 1 μm , 2 μm e 5 μm , respectivamente. Nessas amostras os nitretos tornam-se cada vez mais grosseiros com o aumento do tempo de nitretação. Por outro lado, o aumento da espessura da camada de compostos reduz o sulcamento.

Descrição dos danos:

SN – Sulcos indicados pelas setas na vista de topo. Intensa deformação plástica com deslocamento do material no sentido do movimento e intenso refino de grão acima da linha tracejada na seção transversal.

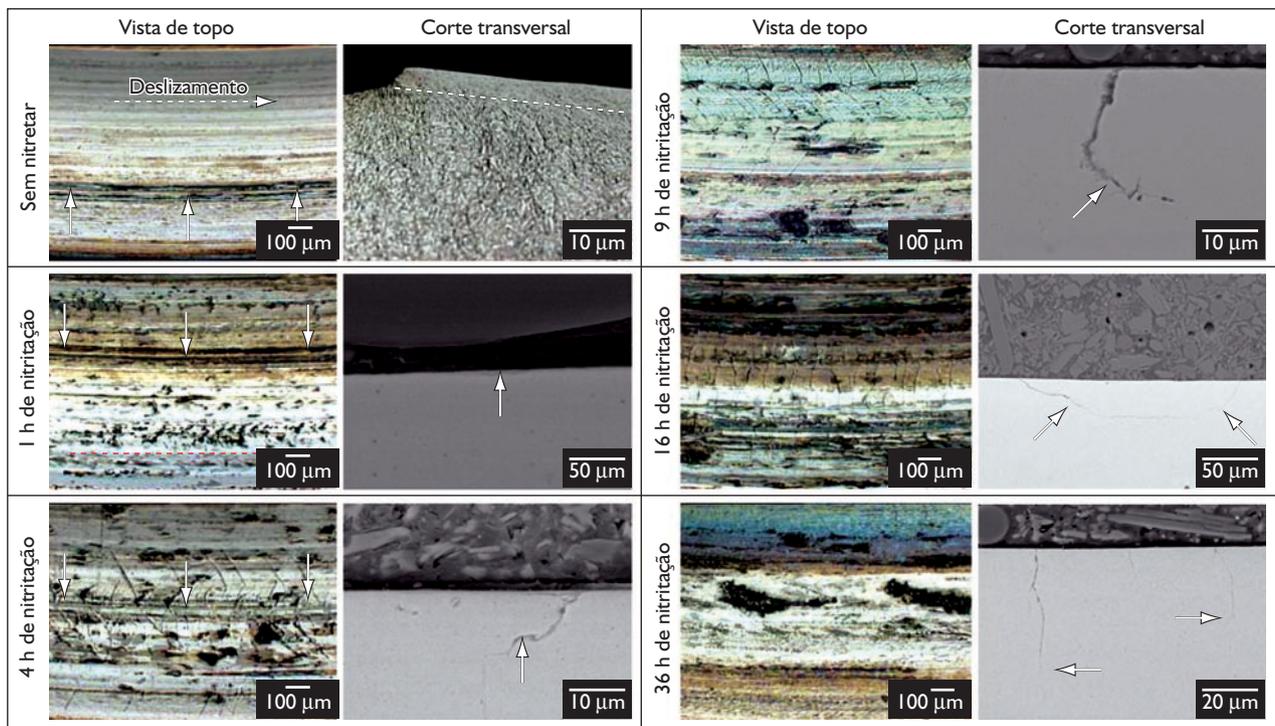


Figura 3. Danos típicos das superfícies desgastadas das amostras nitretadas.

1 h – Sulcos indicados pelas flechas na vista de topo. Trincas acima da linha tracejada na mesma vista. Na vista transversal observa-se pequena trinca paralela à superfície indicada pela flecha. Oxidação indicada pela coloração marrom na vista de topo. As regiões escuras são lascamentos, indícios de material arrancado.

4 h – Sulcos e trincas na vista de topo. Trincas maiores, mais profundas e curvadas, na vista transversal. Oxidação indicada pela coloração marrom na vista de topo. Os arrancamentos são maiores e mais frequentes que na amostra nitretada por 1 hora.

9 h e 16 h – Aspectos semelhantes entre si com maiores propagações de trincas para o maior tempo de nitretação. As trincas são curvadas. Em ambas as amostras não se observam sulcos como nas anteriormente analisadas. A oxidação continua ocorrendo, assim como os arrancamentos.

36 h – As trincas ocorrem em menor quantidade, assim como os arrancamentos que são, entretanto maiores que nas demais amostras. No corte transversal nota-se que as trincas se propagam apenas perpendicularmente à superfície.

3.3 Atrito

O coeficiente de atrito (μ) obtido da relação (F_f/C_n) atinge o valor máximo de 0,25 para todos os materiais estudados. O valor de μ entre 0,15 e 0,25 é fortemente dependente da limpeza da trilha de desgaste. O efeito da limpeza da trilha pode ser observado na Figura 4, gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo de deslizamento representativo para todas as condições estudadas, independente do corpo-de-prova ou do período de ensaio. Há um comportamento oscilatório do coeficiente de atrito em função do tempo de deslizamento.

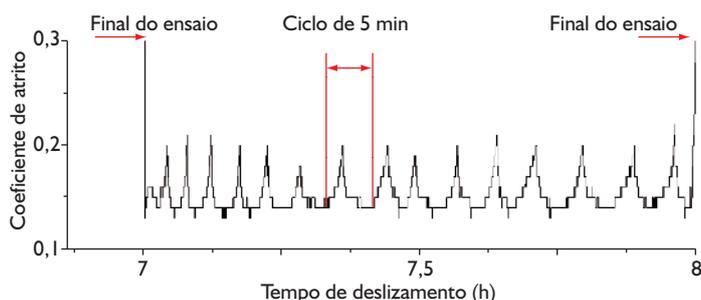


Figura 4. Coeficiente de atrito em função do tempo de deslizamento da oitava hora de ensaio da amostra 9 h.

Os pontos mais altos da curva, exceto aqueles de reinício e fim do ensaio, correspondem ao momento em que o limpador foi acionado e nos pontos mais baixos o momento em que foi desligado.

Embora a literatura clássica de materiais para aplicações de atrito e desgaste⁽³⁾ descreva os materiais nitretados como redutores de atrito, estudos preliminares mostram que, na ausência do limpador de partículas o coeficiente de atrito pode atingir valores na ordem de 1. Outros pesquisadores^(7,14) também obtêm valores

altos de atrito em condições de deslizamento e carregamento semelhantes ao deste estudo com materiais nitretados. Este estudo mostra que a remoção das partículas de desgaste resulta em valores médios (0,2) abaixo dos normalmente relatados na literatura e, o que é mais importante, em valores mínimos de 0,14 sem lubrificação, sempre que a limpeza da pista de desgaste era feita continuamente. Efeito semelhante da remoção de partículas de desgaste é observado em sistemas não nitretados por Hwang, Kim e Lee.⁽¹⁵⁾ Estes resultados abrem uma nova perspectiva para o estudo do atrito de materiais nitretados visando a obtenção de coeficientes de atrito ainda menores e a seco. Da mesma forma abre novas e promissoras perspectivas para aplicações do tratamento de nitretação.

5 CONCLUSÃO

Os ensaios de desgaste por deslizamento das amostras nitretadas mostram que, quanto maior o tempo de nitretação, maior a espessura da camada nitretada e maior é a resistência aos mecanismos de danos.

Os mecanismos de danos, ou mecanismos de desgaste por deslizamento, são: deformação plástica, sulcamento e lascamento. A quantidade de lascamento e trincas superficiais associadas a este dano são mais frequentes nas amostras nitretadas por 4 h, 9 h e 36 h. Por outro lado, a deformação plástica e o sulcamento têm maior intensidade na amostra sem nitretar e naquela nitretada por 1 h.

O coeficiente de atrito médio para todas as condições é igual a 0,2. Identifica-se neste trabalho a forte redução do coeficiente de atrito com a remoção das partículas de desgaste da trilha de deslizamento.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de doutorado de acordo com o processo número 142812/2006-4.

Ao Prof. Fernando Alvarez pela disponibilização do equipamento PlasmaTec 450 do Laboratório de Implantação Iônica e Tratamentos de Superfícies do DFA-IFGW-UNICAMP para realização dos tratamentos de nitretação por plasma pulsado.

REFERÊNCIAS

- 1 SINATORA, A. *Tribologia: um resgate histórico e o estado-da-arte*. 2005. 33 f. Erudição (Professor Titular) – Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- 2 JOST, H. P. Tribology: origin and future. *Wear*, v. 136, n. 1, p. 1-17, Feb. 1990.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Friction, lubrication and wear technology. In: _____. *Metals handbook*. 2. ed. Metals Park, Oh, 1992. v. 18, p. 942.
- 4 ZUM GAHR, K. H. *Microstructure and wear of materials*. New York: Elsevier, 1987.
- 5 ARCHARD, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, v. 24, n. 8, p. 981-8, Aug. 1953.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Heat treating. In: _____. *Metals handbook*. Metals Park, Oh, 1991. v. 4, p. 1012.
- 7 KARAMIS, M. B. An investigation of the properties and wear behaviour of plasma-nitrided hot-working steel (H13). *Wear*, v. 150, n. 1-2, p. 331-42, Oct. 1991.
- 8 DEVI, M. U.; CHAKRABORTY, T. Y.; MOHANTY, O. N. Wear behaviour of plasma nitrided tool steels. *Surface and Coatings Technology*, v. 116-9, n. 1, p. 212-21, Sept. 1999.
- 9 CORENGIA, P.; WALTHER, F.; YBARRA, G.; SOMMADOSSI, S.; CORBARI, R.; BROITMAN, E. Friction and rolling-sliding wear of DC-Pulsed plasma nitride AISI 410 martensitic stainless steel. *Wear*, v. 260, n. 4-5, p. 479-85, Feb. 2006.
- 10 TANAKA, D. K.; SINATORA, A. As leis do atrito: da Vinci, Amonton ou Coulomb. *Revista ABCM Engenharia*, v. 12, n. 1, p. 31-4, out. 2007.
- 11 SUN, Y.; BELL, T.; WOOD, G. Wear behaviour of plasma-nitrided martensitic stainless steel. *Wear*, v. 178, n. 1-2, p. 131-8, Nov. 1994.
- 12 SUH, N. P. An overview of the delamination theory of wear. *Wear*, v. 44, n. 1, p. 1-16, Aug. 1977.
- 13 BAYER, R. G. *Wear analysis for engineers*. New York: HNB, 2002.
- 14 KARAOGU, S. Structural characterization and wear behaviour of plasma-nitrided AISI 5140 low alloy steel. *Materials Characterization*, v. 49, n. 4, p. 349-57, Nov. 2003.
- 15 HWANG, D. H.; KIM, D. E.; LEE, S. J. Influence of wear particle interaction in the sliding interface on friction of metals. *Wear*, v. 225-9, n. 1, p. 427-39, Apr. 1999.

Recebido em: 6/11/2008

Aceito em: 21/10/2009