

# RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS E A MICROESTRUTURA DO AÇO ABNT H13 NITRETADO POR PLASMA PULSADO<sup>1</sup>

Mario Vitor Leite<sup>2</sup>  
Carlos A. Figueroa<sup>3</sup>  
Israel J. R. Baumvol<sup>3</sup>  
Rodrigo L. O. Basso<sup>4</sup>  
Paulo R. Mei<sup>5</sup>  
Amilton Sinatora<sup>6</sup>

## Resumo

Discos de aço ABNT H13 foram nitretados por plasma pulsado numa atmosfera 20 % N<sub>2</sub> e 80 % H<sub>2</sub>, 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 utilizado uma esfera de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> com 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 horas, a velocidade de 0,05 ms<sup>-1</sup>, totalizando uma distância de deslizamento de 1440 m. Os resultados deste ensaio mostraram que quanto maior o tempo de nitretação menor o volume de material desgastado. Os mecanismos de desgaste observados foram: deformação plástica, sulcamento e lascamento e estão relacionados com as características microestruturais da camada nitretada. O coeficiente de atrito medido foi de 0,2 para todas as condições testadas.

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

## TRIBOLOGICAL PROPERTIES - MICROSTRUCTURE RELATIONSHIP OF ABNT H13 TOOL STEEL NITRIDED BY PULSED PLASMA

### Abstract

ABNT H13 tool steel discs were nitrided by pulsed plasma in an atmosphere 20 % N<sub>2</sub> and 80 % H<sub>2</sub> and at a temperature of 400 °C in different times: 1 h, 4 h, 9h, 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 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> with 7.14 mm of diameter with an applied normal load of 800 N was used. The disc slid under the sphere without lubricant for 8 hours at a sliding speed of 0.05 ms<sup>-1</sup> up to a total distance of 1440 m. The results showed that longer nitriding times reduce the volume of wear. The following wear mechanisms were observed: plastic deformation, ploughing and spalling. They were related to the microstructure of the nitrided layer. The coefficient of friction was 0.2 for all tested conditions.

**Key words:** Plasma nitriding; Sliding wear; Friction.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 6º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 20 a 22 de agosto de 2008, São Paulo, SP*

<sup>2</sup> *M.Eng. Doutorando do Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP*

<sup>3</sup> *Dr. Professor do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul – RS.*

<sup>4</sup> *Dr. Pesquisador do Instituto de Física “Gleb Wataghin” da UNICAMP, Campinas – SP.*

<sup>5</sup> *Dr. Professor do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da UNICAMP, Campinas – SP.*

<sup>6</sup> *Dr. Gerente de Inovação e Tecnologia da Aços Villares S.A., Pindamonhangaba – SP.*

## 1 INTRODUÇÃO

Uma rápida pesquisa pelos dicionários da Língua Portuguesa sobre a palavra “desgastar” resulta nas seguintes expressões: *gastar aos poucos*; *gastar pelo uso*. Todos têm a visão de que se gastou, houve perda. Sinatora<sup>(1)</sup> apresentou que as perdas devido ao desgaste no Brasil, considerando o PNB em 2004 de 1,7 trilhões de reais, estão entre 17 (1%) a 104 (6%) bilhões de reais por ano. O conhecimento para reduzir estas perdas está numa ciência relativamente nova que estuda a interação entre corpos com movimento relativo, a Tribologia.

Tribologia, do grego *tribos* (τριβος) que significa roçar-esfregar, foi 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.”<sup>(2)</sup>

Talvez um dos grandes desafios na resolução dos problemas de desgaste seja antecipar a forma na qual este irá ocorrer sobre um dado componente. Basicamente, a perda de material pode ocorrer de três formas: por fusão, por dissolução química ou ainda por separação física dos átomos da superfície.<sup>(3)</sup>

Conhecer a forma na qual ocorre a remoção de material pouco ajuda na compreensão do desgaste. A norma DIN 50320 classificou os processos de desgaste de acordo com o tipo de movimento (deslizamento, rolamento, oscilatório e de impacto) e estado físico do corpo que exerce ação sobre o outro (desgaste erosivo). Cada processo envolve um ou mais mecanismos de desgaste que podem ser resumidos em: adesão, abrasão, reações triboquímicas e fadiga superficial. Além destes, cita-se também a deformação plástica, que apesar da importância que tem sobre vários tipos de desgaste é pouco comum abordá-la como um mecanismo de desgaste.<sup>(4)</sup>

Uma vez dividido e delineado os problemas surgiram modelos relacionados aos mecanismos que auxiliam na predição do desgaste. O modelo mais difundido na literatura 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 fração do material na qual efetivamente ocorre o contato, também conhecida como constante de desgaste ( $K$ ); a segunda é referente à força normal que atua sobre os corpos ( $F$ ) e a terceira é a parcela referente a uma propriedade do material, a dureza ( $H$ ). Esta relação é apresentada pela Equação 1.<sup>(5)</sup>

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

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 modificar as superfícies de componentes sujeitos ao desgaste visando endurecê-la.

O processo de nitretação a plasma é mais um entre inúmeros capazes de promover o endurecimento superficial.<sup>(6)</sup> Há estudos sobre os benefícios que a nitretação a plasma oferece para os materiais destinados à aplicação na qual o desgaste tem grande influência sobre a funcionalidade do equipamento, e.g. Efeito da nitretação a plasma de um aço ABNT H13 para ferramentas de conformação mecânica.<sup>(7,8)</sup>

O fato que potencializa mais um estudo sobre o efeito dos parâmetros da nitretação a plasma na resistência ao desgaste do aço ABNT H13 é justamente o ponto que torna tão desafiador o entendimento do desgaste, ou seja, as inúmeras combinações entre

tipos dos corpos em contato, variações do processo de desgaste quanto ao tipo de movimento e esforços mais os mecanismos de desgaste.

O objetivo deste trabalho é descrever os danos causados durante o desgaste por deslizamento a seco, simulado em condições laboratoriais, e relacioná-los as modificações microestruturais sofridas pelo aço ABNT H13 nitretado a plasma em diferentes tempos.

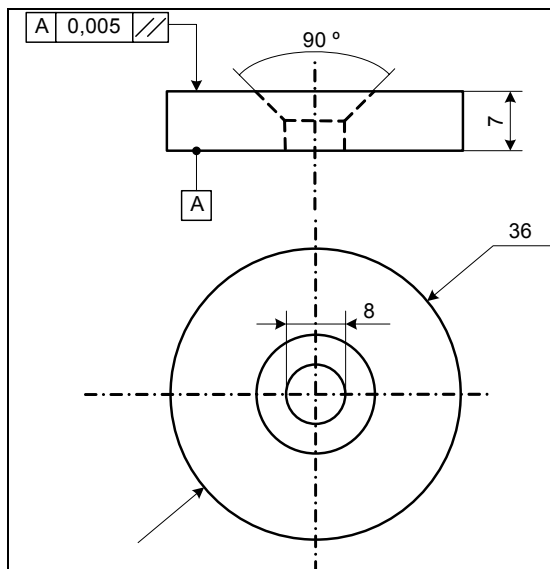
## 2 DETALHAMENTO EXPERIMENTAL E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

O estudo da relação entre propriedades microestruturais com a resistência ao desgaste de um material nitretado em diferentes tempos foi realizado utilizando o aço ABNT H13, temperado a partir de uma temperatura de austenitização de 1030 °C e duplamente revenido a 580°C por 2 h cada. A dureza resultante deste tratamento térmico foi de  $570 \pm 6 \text{ HV}_{0,1}$ .

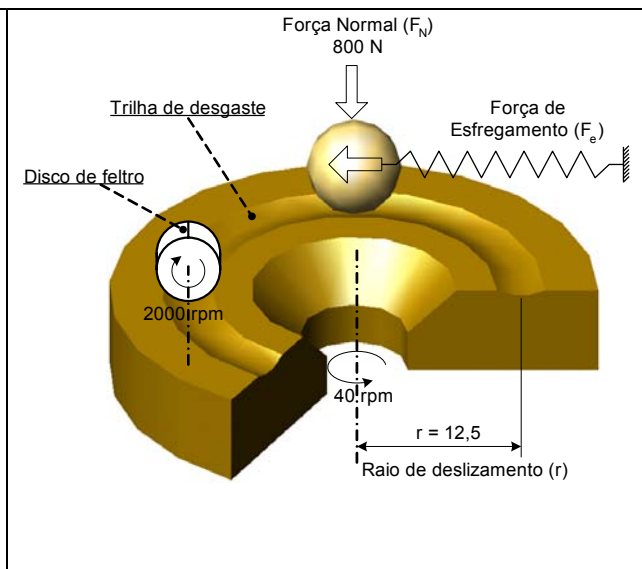
A geometria dos corpos-de-prova tem o formato de disco com as dimensões apresentadas na Figura 1. O tratamento de nitretação foi realizado por plasma com uma atmosfera de composição 20% de  $\text{N}_2$  e 80% de  $\text{H}_2$ , à temperatura de 400°C em diferentes tempos: 1 h, 4 h, 9 h, 16 h e 36 h.

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 e um difratômetro de raios-X (DRX) da marca Shimadzu, modelo D-6000.

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 (Figura 2).



**Figura 1.** Desenho de fabricação do disco. Dimensões em mm.



**Figura 2.** Representação esquemática da configuração do ensaio de deslizamento com limpeza da trilha de desgaste.

Durante o deslizamento, o disco nitretado, gira no sentido anti-horário a 40 rotações por minuto (rpm) em contato com uma esfera de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , com 7,14 mm de diâmetro e carga normal aplicada de 800 N. O período de deslizamento foi de 8 horas e a distância percorrida com velocidade de  $0,05 \text{ ms}^{-1}$  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

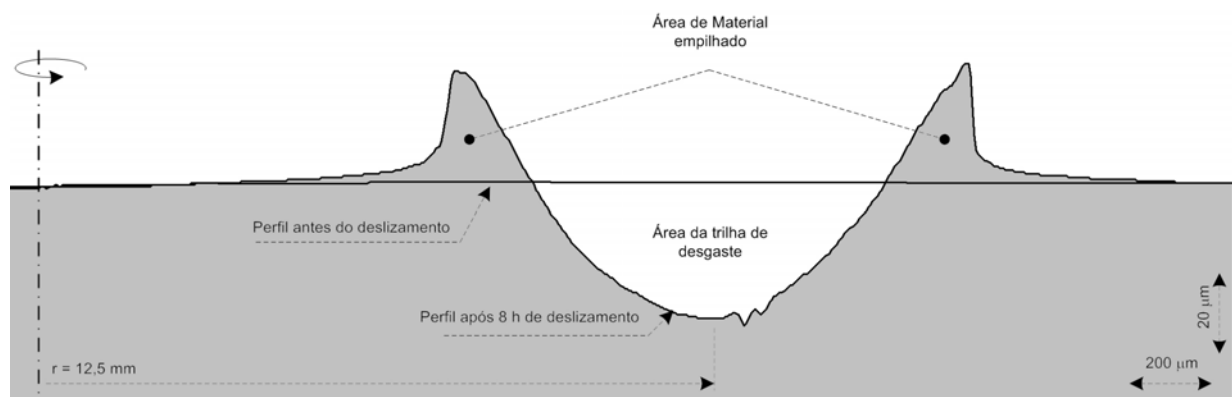
este procedimento, o disco era limpo em banho ultra-sônico enquanto que a esfera além de limpa era girada para que ao iniciar um novo período de deslizamento apresentasse as mesmas condições superficiais.

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 2000 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, àquela que oferece resistência ao movimento, será chamada de força de esfregamento ( $F_e$ ) e o resultado da divisão de  $F_e$  pela força normal ( $F_n$ ), conforme a primeira Lei do Atrito, se obtém o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) do esfregamento.<sup>(9)</sup>

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 1700 $\alpha$ , que utiliza uma ponta cônica de diamante com raio igual a  $2\ \mu\text{m}$ . A amplitude máxima de medição no eixo vertical do perfil é de  $800\ \mu\text{m}$  com resolução de  $0,05\ \mu\text{m}$ . Os perfis topográficos foram obtidos sempre numa mesma região antes e após cada hora de deslizamento. A Figura 3 mostra um exemplo destes perfis e as informações que podem ser obtidas.



**Figura 3.** Exemplo de perfis topográficos antes e após o deslizamento sobrepostos.

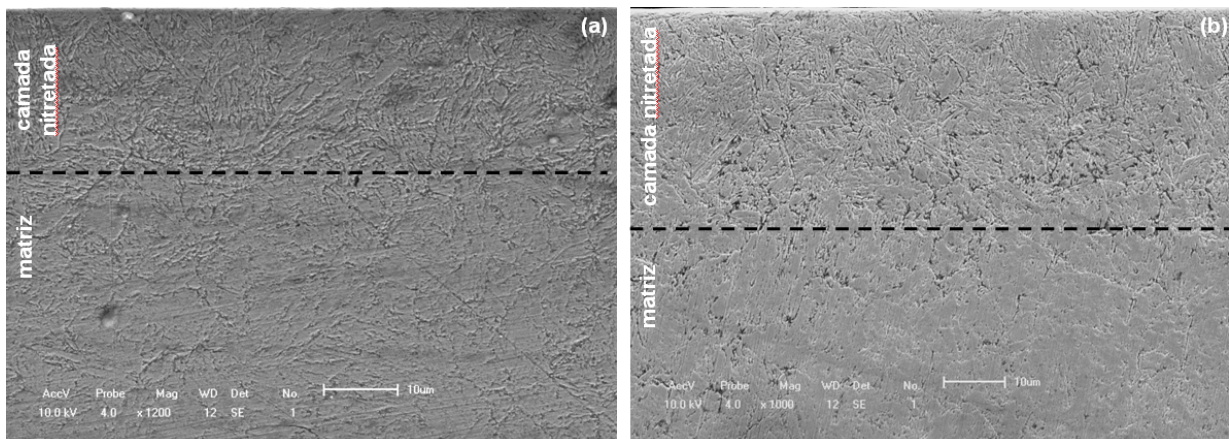
A Figura 3 apresenta os perfis topográficos antes do deslizamento e após 8 horas de um disco ensaiado. Observa-se que da sobreposição destes há uma área abaixo do perfil inicial, que será abordada como área da trilha de desgaste ( $A_{td}$ ) e outra acima que será chamada de área de material empilhado ( $A_{me}$ ). O volume da trilha de desgaste ( $V_{td}$ ) foi determinado considerando que a área ( $A_{td}$ ) é constante em todo o perímetro da trilha com a seguinte expressão: ( $V_{td} = 2\pi r A_{td}$ ), onde  $r$  é o raio de deslizamento apresentado na Figura 3.

Será 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. Para o disco sem nitretação vale a seguinte nomenclatura: SN.

### 3 RESULTADOS e DISCUSSÕES

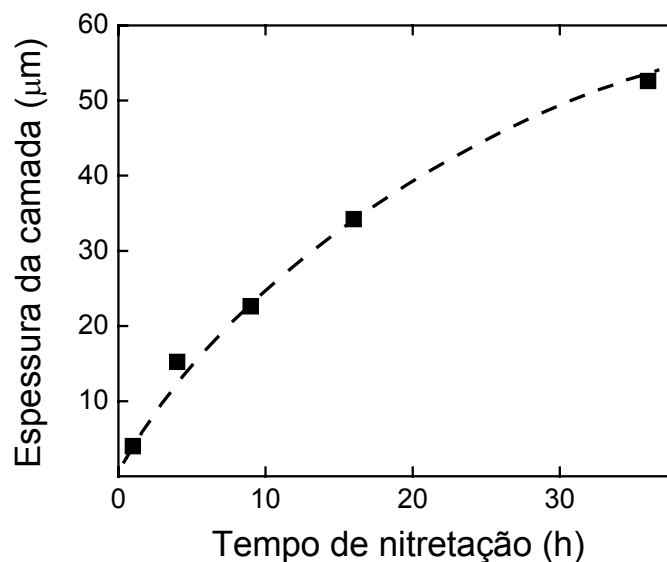
#### 3.1 Caracterização das Amostras Nitretadas

A espessura das camadas nitretadas foi medida por meio das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura. A Figura 4 apresenta um exemplo do contraste promovido na microestrutura devido a nitretação. O contraste foi obtido por ataque químico utilizando o reagente Nital com 5% de concentração.



**Figura 4.** Aspectos microestruturais das amostras nitretadas após ataque químico com reagente Nital 5 %. (a) seção transversal da amostra 9 h. (b) seção transversal da amostra 16 h.

A Figura 5 apresenta a dependência da espessura da camada com o tempo de nitretação.



**Figura 5.** Espessura da camada em função do tempo de nitretação.

#### 3.2 Ensaio de Desgaste

Medir a quantidade de material removido pela diferença de massa do disco antes e depois do deslizamento não possibilitou classificar os materiais, isto porque mesmo

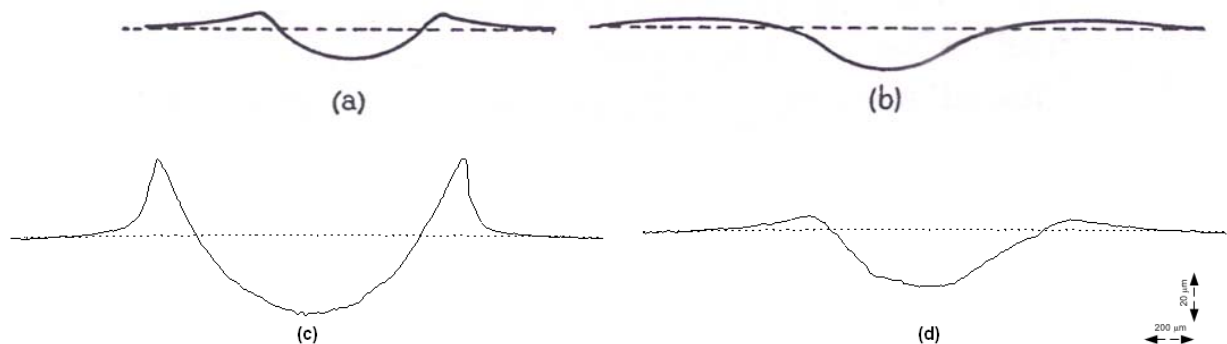
após 8 horas, ou 1.440 m de deslizamento, o disco que apresentou maior redução de massa foi o (1 h) com  $2,2 \pm 0,5$  mg e aquele que perdeu menos massa foi o (16 h) com  $1,1 \pm 0,5$  mg.

O fato que impossibilita maiores discussões sobre estes resultados está relacionado ao procedimento experimental, pois foi utilizada uma balança com resolução máxima de 0,1 mg com medições a cada hora de deslizamento com valores próximos a sua sensibilidade.

A massa total removida é a soma das diferenças de massa a cada hora de deslizamento, dessa forma o erro da medição é propagado para o valor final.

Porém há uma outra forma de quantificar o desgaste, medindo o volume ( $V_{td}$ ), o que corresponde ao material que foi removido ou o resultado da sua soma com o material deslocado para a borda da trilha, formando a área ( $A_{me}$ ), assim como descrito e apresentado na Figura 3.

A formação da área ( $A_{me}$ ) não pode ser abordada como aquela comumente encontrada em ensaio de dureza, onde recebem a denominação de *piling-up*, comum para materiais altamente encruados, e *sinking-in*, para materiais recozidos, Tabor<sup>(10)</sup>. A Figura 6 (a) e a Figura 6 (b) são representações esquemáticas destes fenômenos.

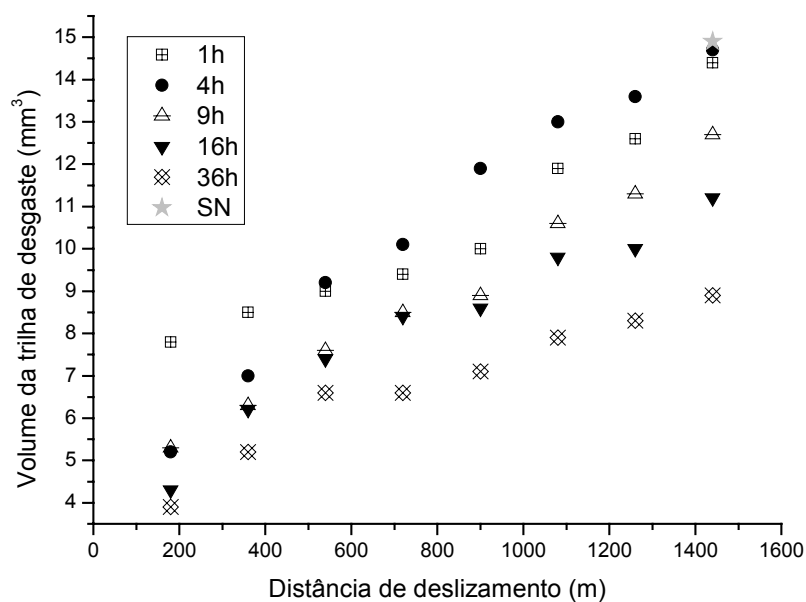


**Figura 6.** Representação esquemática do (a) piling-up, para metais altamente encruados e (b) sinking-in para metais recozidos.<sup>(10)</sup> Perfis topográficos antes (linha pontilhada) e após oito horas de deslizamento (linha contínua) para os materiais (c) 1 h e (d) 36 h.

A Figura 6 (c) e a Figura 6 (d) mostram a similaridade dos perfis do material deslocado pela esfera deslizante do ensaio de desgaste com aquele deslocado por uma esfera em ensaio de dureza.

A comparação entre os perfis deve permanecer apenas sob o ponto de vista morfológico, pois além da diferença de carregamento estático do ensaio de dureza contra o deslizante do ensaio de desgaste, o material nitretado por 1 hora tem dureza inferior aquele nitretado por 36 horas e assim as características dos perfis estão trocadas em relação aos materiais de maior dureza (encruados) com os de menor dureza (recozidos).

Dessa forma, abordando o desgaste apenas com o volume da trilha de desgaste, apresenta-se na Figura 7 a variação do volume ( $V_{td}$ ) com a distância de deslizamento para os diferentes tempos de nitretação.



**Figura 7.** Variação do volume da trilha de desgaste ( $V_{td}$ ) em função da distância de deslizamento.

Estabelecendo o critério de que quanto maior o volume ( $V_{td}$ ) menor é a resistência ao desgaste promovida pelo tratamento de nitretação, descreve-se a seguir o desempenho de cada amostra.

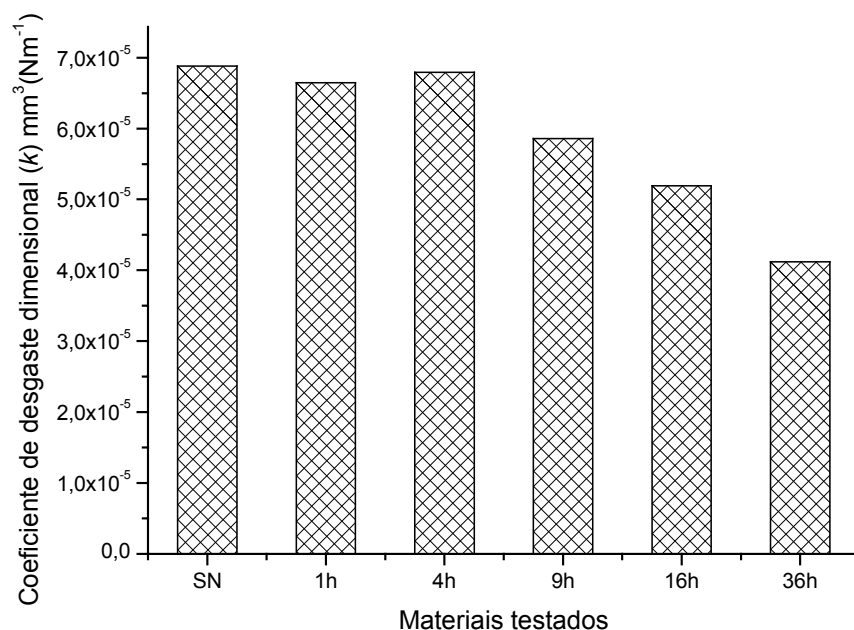
*i/ 2 horas de deslizamento (360 m):* após duras horas de deslizamento observa-se que a amostra 1 h sofre maior desgaste enquanto que as demais se prevalecem da maior dureza para resistir a ação da esfera.

*ii/ 3 horas de deslizamento (540 m):* A região endurecida no tratamento por 4 horas não se apresenta vantajosa sobre a amostra nitretada por 1 hora, diferente daquelas nitretadas por 9 h, 16 h e 36 horas, com maior resistência ao desgaste.

*iii/ 6 horas 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, seguindo a tendência de que quanto maior a dureza menor o desgaste. Essa tendência é mantida até o final da oitava hora de deslizamento.

Ainda na Figura 7 pode ser observado que após 8 horas de deslizamento as amostras nitretadas por 1 h e 4 h apresentam o mesmo volume de desgaste da amostra sem nitretação (SN).

Outra forma de comparar a resistência ao desgaste de materiais com diferentes tratamentos e bastante usual para aplicações de engenharia é o coeficiente de desgaste dimensional ou específico ( $k = K/H$ ), apresentado da seguinte forma:  $\text{mm}^3(\text{Nm})^{-1}$ , que representam o volume do material removido no desgaste ( $\text{mm}^3$ ) por unidade de deslizamento (m), pela carga normal aplicada (N).<sup>(11)</sup> A Figura 8 apresenta os valores de ( $k$ ) para os materiais estudados.



**Figura 8.** Variação do coeficiente de desgaste dimensional ( $k$ ) para os materiais testados.

Valores de coeficiente ( $k$ ) entre  $10^{-6}$  e  $10^{-5}$  em condições de deslizamento com carregamento cíclico, como utilizado neste trabalho, indicam que o desgaste pode ser classificado como moderado e os mecanismos de danos estão relacionados às deformações que surgem do carregamento repetitivo. Nesta situação há formação e propagação de trincas, acúmulo de deformações plástica e lascamento.<sup>(12)</sup>


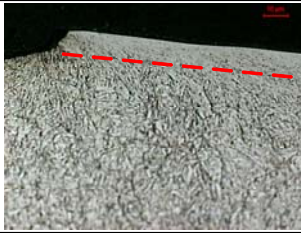
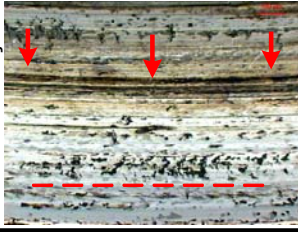
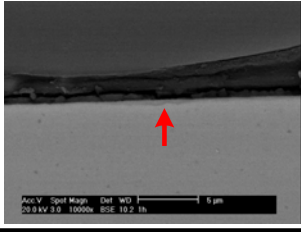
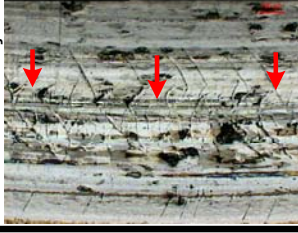
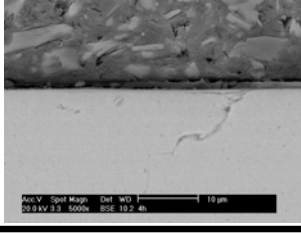
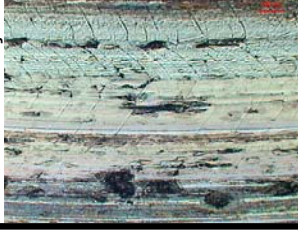
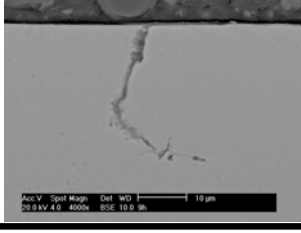

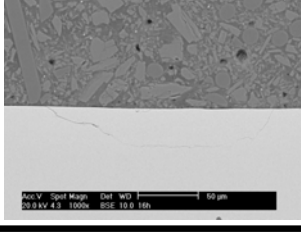

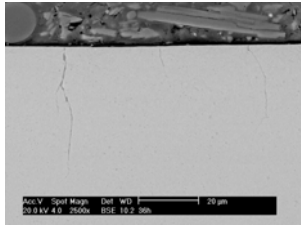
Pode ser observado na tabela dos danos de desgaste (Quadro 1) que o lascamento é um mecanismo que se destaca nas amostras nitretadas com tempo superior a 4 horas. Sun et al.<sup>(13)</sup> estudaram o comportamento de desgaste do aço inox martensítico nitretado a plasma e abordaram o lascamento pela teoria da delaminação de Suh<sup>(14)</sup> a qual é descrita como a formação de trincas superficiais e subsuperficiais, propagação e surgimento de partículas 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 a precipitação de nitretos nos contornos de grão (Edenhofer, 1974 *apud* Sun e colaboradores<sup>(13)</sup>).

Análises por difração de raios-X mostraram que com o aumento do tempo de tratamento, aumenta a quantidade da fase  $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$  com intensa distorção na rede cristalina.

Na amostra 1 h não há formação da camada de compostos e os precipitados da fase  $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$  estão finamente dispersos na matriz. A formação da camada de compostos coincide com a presença de trincas superficiais. Na amostra 4 h esta camada é descontínua e inferior a  $1 \mu\text{m}$ . Com 9 h, 16 h e 36 h a camada de compostos atinge uma espessura de  $1 \mu\text{m}$ ,  $2 \mu\text{m}$  e  $5 \mu\text{m}$  respectivamente. Nessas amostras os nitretos tornam-se cada vez mais grosseiros com o aumento do tempo de nitretação.

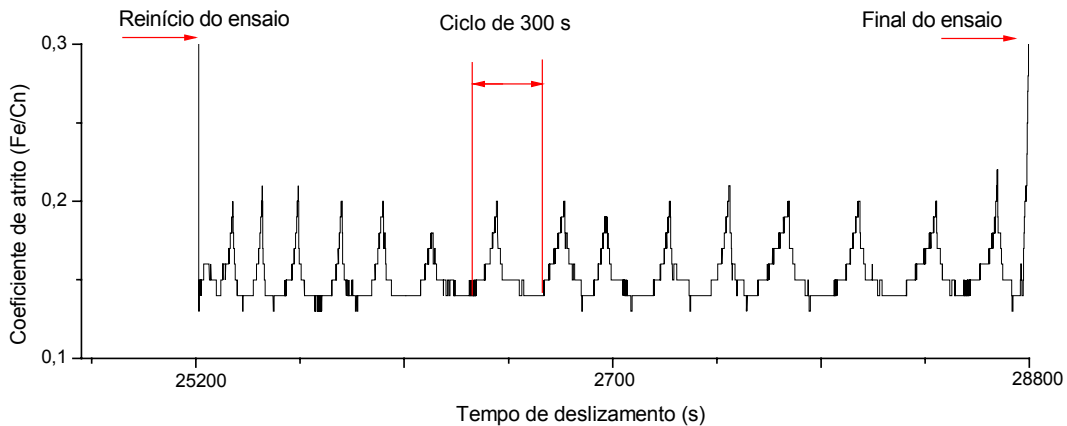


**Quadro 1.** Danos típicos das superfícies desgastadas das amostras nitretadas.

	Vista de topo	Seção transversal	Descrição dos danos de desgaste
Sem Nitretar			As fotos da superfície da trilha de desgaste e da região transversal mostram que os mecanismos de desgaste do disco SN foram devidos a deformação plástica, evidenciada pelo refino de grão, contornada pela linha tracejada na seção transversal e sulcamento, indicado pelas setas na vista de topo.
1 h de Nitretação			No disco 1 h os mecanismos de desgaste são: deformação plástica, sulcamento e lascamento, região acima da linha tracejada na vista de topo. Na seção transversal obtida por MEV observa-se uma pequena trinca paralela a superfície.
4 h de Nitretação			Além da deformação plástica e sulcamento o lascamento e as trincas passam a prevalecer na superfície da trilha e na seção transversal observa-se que a trinca atinge profundidades maiores.
9 h de Nitretação			A partir de 9 horas de nitretação não se observa danos causados por sulcamento, apenas trincas superficiais e lascamento.
16 h de Nitretação			Há uma grande semelhança entre as superfícies das trilhas 9 h e 16 h, porém elas diferem quanto a deformação plástica e na extensão da propagação da trinca.
36 h de Nitretação			As regiões escuras na superfície da trilha são resultantes dos lascamentos que surgem com menor frequência porém com maiores dimensões. Há uma quantidade menor de trincas superficiais e quando observadas na seção transversal nota-se que estão perpendiculares a superfície.

### 3.3 Atrito

O coeficiente de atrito ( $\mu$ ) obtido da relação ( $F_e/C_n$ ) foi de  $0,20 + 0,05$  para todos os materiais estudados. O valor médio de  $\mu = 0,2$  obtido nestes ensaios é fortemente dependente do acionamento do disco de feltro responsável pela limpeza da trilha de desgaste. O efeito da limpeza da trilha pode ser observado na Figura 9, onde 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 9.** Coeficiente de atrito em função do tempo de deslizamento da oitava hora de ensaio da amostra 09 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.

A Figura 9 apresenta o comportamento típico do coeficiente de atrito, não somente da oitava hora de ensaio como também das precedentes. Além disso, o comportamento se repete para as demais amostras. Há apenas uma diferença das curvas de atrito entre os materiais e está relacionada à frequência de acionamento do limpador de partículas, porém estudos mais detalhados deverão ser realizados como continuação deste trabalho.

Embora a literatura clássica de materiais para aplicações de atrito e desgaste<sup>(3)</sup> descreva os materiais nitretados como redutores de atrito, estudos preliminares mostraram que na ausência do limpador de partículas o coeficiente de atrito pode atingir valores na ordem de 1. Outros pesquisadores<sup>(7,15)</sup> também obtiveram valores altos de atrito em condições de deslizamento e carregamento semelhantes ao deste estudo com materiais nitretados.

Este estudo não tem o objetivo de descrever os mecanismos que operam durante a limpeza da trilha de desgaste, porém, é conhecido que a remoção física das partículas da trilha de desgaste promove a redução imediata do coeficiente de atrito, como apresentado por Hwang et al.<sup>(16)</sup>

## 5 CONCLUSÃO

Os ensaios de desgaste por deslizamento das amostras nitretadas mostraram que quanto maior o tempo de nitretação – maior a quantidade e tamanho dos precipitados da fase  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N e conseqüentemente maior a dureza – maior é a resistência aos mecanismos de danos.

Os mecanismos de danos, ou mecanismos de desgaste por deslizamento foram: deformação plástica, sulcamento e lascamento. A quantidade de lascamento e trincas superficiais associadas a este dano são mais freqüente 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 para todas as condições foi igual a 0,2. Foi identificada neste trabalho a forte relação do atrito com a presença das partículas de desgaste. Trabalhos futuros serão realizados com o objetivo de caracterizar estas partículas.

## **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. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- 2 JOST, H.P. Tribology – origin and future. *Wear*, 136, 1990. p. 1-17.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Friction, Lubrication and Wear Technology. In: *Metals Handbook*, Vol. 18. 1992. p. 942.
- 4 ZUM GAHR, K. H. Microstructure and wear of materials. Elsevier, 1987.
- 5 ARCHARD, J.F., Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *J. Appl. Phys.* 241, 1953, p. 891-988.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Heat treating. In: *Metals Handbook*, Vol. 4. 1991. p. 1012.
- 7 KARAMIS, M.B. An investigation of the properties and wear behaviour of plasma-nitrided hot-working steel (H13). *Wear*, 150, 1991. p. 331-342.
- 8 DEVI, M.U.; CHAKRABORTY, T.Y.; MOHANTY, O.N. Wear behaviour of plasma nitrided tool steels. *Surface and coatings technology*, 116-119, 1999. p. 212-221.
- 9 TANAKA, D.K.; SINATORA, A. As leis do Atrito: da Vinci, Amonton ou Coulomb. *Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas*, 12, 2007. p. 31-34.
- 10 TABOR, D. *The Hardness of Metals*. Oxford, London, 1951.
- 11 HUTCHINGS, I.M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 1.ed. London: Edward Arnold, 1992.
- 12 BAYER, R.G. *Wear Analysis for Engineers*. HNB Publishing, New York, 2002.
- 13 SUN, Y.; BELL, T.; WOOD, G. Wear behaviour of plasma-nitrided martensitic stainless steel. *Wear*, 178, 1994. p. 131-138.
- 14 SUH, N.P. An overview of the delamination theory of wear. *Wear*, 44, 1977. p. 1-16.
- 15 KARAOGLU, S. Structural characterization and wear behaviour of plasma-nitrided AISI 5140 low alloy steel. *Materials Characterization*, 49, 2003. p. 349-357.
- 16 HWANG, D.H.; KIM, D.E.; LEE, S.J. Influence of wear particle interaction in the sliding interface on friction of metals. *Wear*, 225-229, 1999. p. 427-439.