

# DESGASTE POR DESLIZAMENTO DO AÇO AISI H13 NITRETADO COM REVESTIMENTOS DE TiN, TiC E MULTICAMADAS<sup>1</sup>

Mario Vitor Leite<sup>2</sup>  
Abel André Cândido Recco<sup>3</sup>  
Maria Cristina Moré Farias.<sup>4</sup>  
Roberto Martins de Souza<sup>5</sup>  
Andre Paulo Tschiptschin.<sup>6</sup>  
Amilton Sinatora<sup>6</sup>

## Resumo

Este trabalho apresenta a caracterização tribológica de quatro tipos diferentes de filmes finos a base de TiN e TiC, resultantes da combinação das variáveis do processo de deposição por Triodo Magnetron Sputtering, depositados sobre o aço AISI H13 temperado, duplamente revenido e nitretado em condições laboratoriais de desgaste por deslizamento. Para isto, foi utilizado um tribômetro tipo esfera-sobre-disco, que monitora a força de atrito, e discos revestidos que deslizaram em contato com uma esfera de aço AISI 52100, com velocidade de 0,05 m/s, carga normal de 5,2 N por 1800 s. Os danos foram caracterizados com as técnicas de perfilometria de contato, microscopia óptica e eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que os revestimentos a base de TiC apresentaram os menores valores de coeficiente de atrito ( $\mu = 0,2$ ) e que os valores mais elevados de atrito ( $\mu > 0,6$ ), como no caso dos revestimentos a base de TiN, há sempre óxidos aderidos nas trilhas e nas partículas de desgaste.

**Palavras-chave:** TiN; TiC; Multicobertura; Tribologia; Coeficiente de atrito.

## SLIDING WEAR OF THE NITRIDED AISI H13 TOOL STEEL WITH TiN, TiC AND MULTILAYER COATINGS

### Abstract

This work presents the tribological characterization of four different types of TiN-based and TiC-based thin films, resultants from the combination of the variables of the Triode Magnetron Sputtering deposition process. These films were deposited on a quenched, double tempered and nitrided AISI H13 steel. The tribological behavior of these thin films was studied using a tribometer ball-on-disc type that monitors the friction force and coated discs that slid in contact with an AISI 52100 ball with velocity of 0.05 m/s and normal load of 5.2 N during 1800 s. The damages were characterized with contact profilometry, optical microscopy and scanning electron microscopy techniques. The results showed that the TiC-based coatings presented the same values of friction coefficient ( $\mu = 0.2$ ) and the TiN-based coatings presented the highest values of friction coefficient ( $\mu = 0.6$ ). The worn surfaces presented oxide adhered on the wear tracks, as well as in the composition of the wear particles.

**Key words:** TiN; TiC; Multilayer; Tribology; Friction coefficient.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> M.Eng. Assessor técnico da Villares Rolls.

<sup>3</sup> Dr. Professor da Universidade do Estado de Santa Catarina.

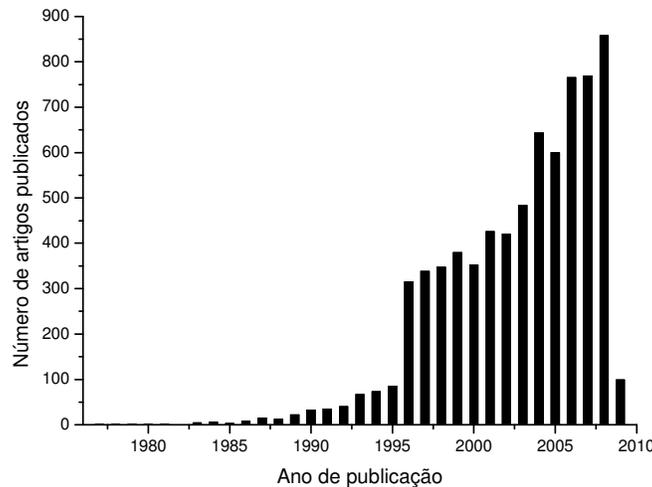
<sup>4</sup> Dra. Pesquisadora do Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

<sup>5</sup> Dr. Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

<sup>6</sup> Dr. Professor titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

# 1 INTRODUÇÃO

Uma pesquisa realizada numa das principais bases de dados de trabalhos científicos, a Scopus,<sup>(1)</sup> com as palavras: *tribology* e *coatings*, que significam tribologia e revestimentos respectivamente, resultam em onze mil cento e setenta artigos. Ao acrescentar nesta pesquisa a palavra *friction* (atrito), o total de artigos foi reduzido em 36 %, mas ainda assim é um número expressivo. São mais de sete mil artigos, que quando apresentados no histograma de unidades de artigos por anos de publicação (Figura 1), revela um crescimento contínuo a cada dois anos, principalmente entre 2001 e 2008.



**Figura 1.** Histograma do número de artigos publicados por ano com citação às palavras tribology, coatings e friction.

O crescente número de publicações apresentado na Figura 1 pode ser atribuído principalmente ao desenvolvimento de três assuntos. Segundo Donnet e Erdemir,<sup>(2)</sup> que realizaram um trabalho com ênfase no histórico de desenvolvimento de revestimentos tribológicos, as três partes que foram identificadas como as bases da pesquisa neste assunto nos últimos 25 anos foram: os materiais e propriedades dos revestimentos; os processos para obtenção dos revestimentos e sua arquitetura. Alinhado com os milhares de trabalhos científicos do assunto este artigo visa estudar o comportamento tribológico dos diferentes revestimentos (TiN, TiC), depositados em condições específicas (*Triodo Magnetron Spputering*) e com uma determinada arquitetura (multicobertura) produzidos e caracterizados na tese de doutorado apresentada no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo por Recco.<sup>(3)</sup>

A necessidade da caracterização tribológica (e.g mecanismos de desgaste e coeficiente de atrito) dos revestimentos obtidos por Recco,<sup>(3)</sup> vai de encontro ao fato que os valores medidos de coeficiente de atrito são fortemente dependentes do sistema que envolve o par em contato deslizante,<sup>(4)</sup> o que justifica estudos detalhados e específicos para a solução de problemas que envolvem o atrito e o desgaste.

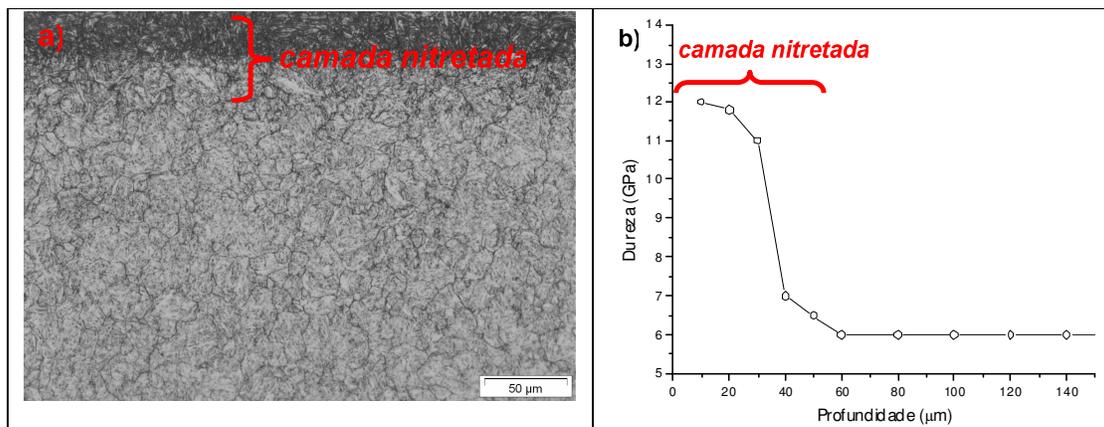
Neste trabalho o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) será tratado conforme a Primeira Lei de Atrito de Amontons e Coulomb dado pela relação entre a força requerida para diminuir o movimento ( $F_{resistente}$ ) com a força normal ( $F_{normal}$ ) aplicada ( $\mu = F_{resistente} / F_{normal}$ ).<sup>(5)</sup>

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Corpos-de-prova para os estudos de desgaste foram usinados no formato de disco a partir de uma barra de seção circular do aço AISI H13 e em seguida tratados termicamente: temperados a partir de 1030 °C e duplamente revenidos a 580°C por duas horas cada, o que conferiu a estes uma dureza de  $570 \pm 6 \text{ HV}_{0,1}$ .

Após o tratamento térmico, as duas superfícies planas de todos os discos usinados (total de 18) foram retificadas e uma destas lixada e polida com abrasivos de diamante em suspensão com tamanho médio de 1  $\mu\text{m}$ , até que fosse produzida uma superfície espelhada com rugosidade média ( $R_a$ ) entre 0,002  $\mu\text{m}$  e 0,004  $\mu\text{m}$ .

Todos os discos foram nitretados a plasma em um reator híbrido para tratamento duplex por Recco,<sup>(3)</sup> com 5 % de  $\text{N}_2$  e 95 %  $\text{H}_2$  em vol. a 520 C, por duas horas. A pressão utilizada durante o tratamento de nitretação foi de 2,5 Torr, corrente de 1,15 A e tensão de aproximadamente 670 V. O aquecimento das amostras foi feito por bombardeamento iônico. Para isto, utilizou-se o argônio juntamente com o  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$  no gás de tratamento. A microestrutura final da camada nitretada é composta somente por zona de difusão, sem a presença da camada branca. Estes resultados foram confirmados por microscopia óptica (Figura 2a), microscopia eletrônica e difração de raios X. O endurecimento promovido pela nitretação atingiu uma profundidade de aproximadamente 50  $\mu\text{m}$ , como apresentado no perfil de dureza da Figura 2b, que foi obtida em um durômetro instrumentado da marca Fisherscope que utiliza penetrador Vickers. A carga no ensaio de dureza instrumentada foi de 50 mN.



**Figura 2.** Perfis de dureza dos aços ferramenta AISI H13 nitretado e microestrutura da camada nitretada, ataque nital 2 %.

O reator híbrido para tratamento duplex, projetado e construído por Recco,<sup>(3)</sup> utiliza para deposição dos filmes a técnica do Triodo Magnetron Sputtering (TMS) desenvolvida por Fontana e Muzart.<sup>(6)</sup> Neste reator é possível obter as camadas nitretadas, assim como a deposição de monocoberturas e multicoberturas sem que as amostras entrem em contato com o ambiente. Para obter as multicoberturas após a etapa de nitretação modificou-se a mistura de gases no interior do reator, que passou a ser composta de nitrogênio e argônio para obter as camadas de TiN, e metano ( $\text{CH}_4$ ) e argônio para obter as camadas de TiC.

Cada tratamento de nitretação e nitretação mais deposição foi realizado com três discos no interior do reator, um disco para cada uma das três repetições do ensaio de desgaste.

Foram produzidos quatro tipos diferentes de filmes, que neste trabalho serão descritos como: TiN, TiC-Mole, TiC-Duro e Multicobertura. As variáveis do processo selecionadas para a obtenção de cada revestimento estão apresentadas na Tabela 1.

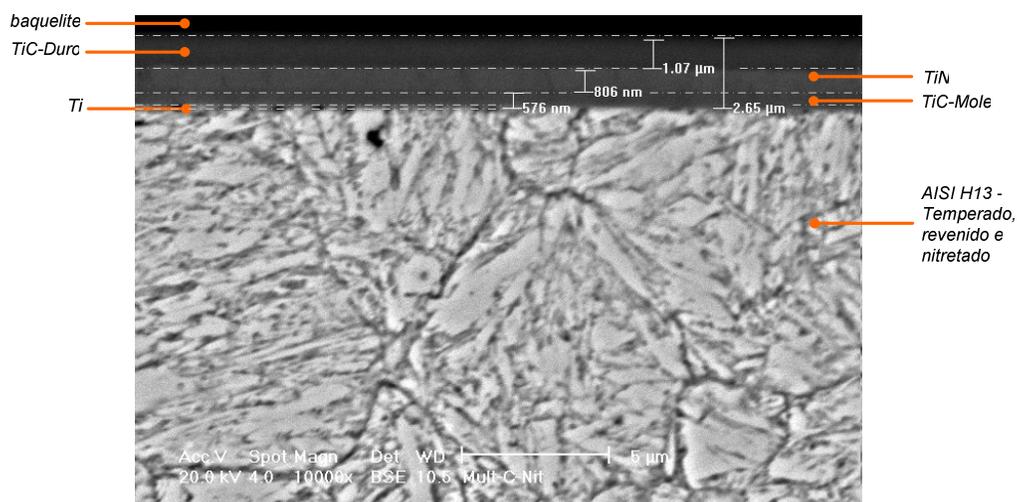
**Tabela 1.** Condições de tratamento por Triodo Magnetron Sputtering para a formação dos filmes estudados

CONDIÇÃO DE DEPOSIÇÃO REATIVA DE Ti + N <sub>2</sub>						
Revestimento	Fluxo de N <sub>2</sub> (sccm)	F <sub>N<sub>2</sub></sub> /F <sub>Ar</sub>	P (mTorr)	Tempo (min)	Espessura (μm)	Dureza (GPa)
TiN	4	0,2	3,3	180	2,1	28
CONDIÇÃO DE DEPOSIÇÃO REATIVA DE Ti + CH <sub>4</sub>						
Revestimento	Fluxo de CH <sub>4</sub> (sccm)	F <sub>N<sub>2</sub></sub> /F <sub>Ar</sub>	P (mTorr)	Tempo (min)	Espessura (μm)	Dureza (GPa)
TiC-Mole	2	0,01	3,1	180	2	18
TiC-Duro	4	0,2	3,4	240	2,2	38
CONDIÇÃO DE DEPOSIÇÃO REATIVA DE Ti + N <sub>2</sub> / Ti + CH <sub>4</sub>						
Revestimento	Fluxo de gás reativo (sccm)		P (mTorr)	Tempo (min)	Espessura (μm)	Dureza (GPa)
Multicobertura	2,0 - 4,0 - 4,0		3,1 - 3,3 - 3,4	240	2,7	

Os parâmetros que foram mantidos constantes, para todas as deposições reativas foram:

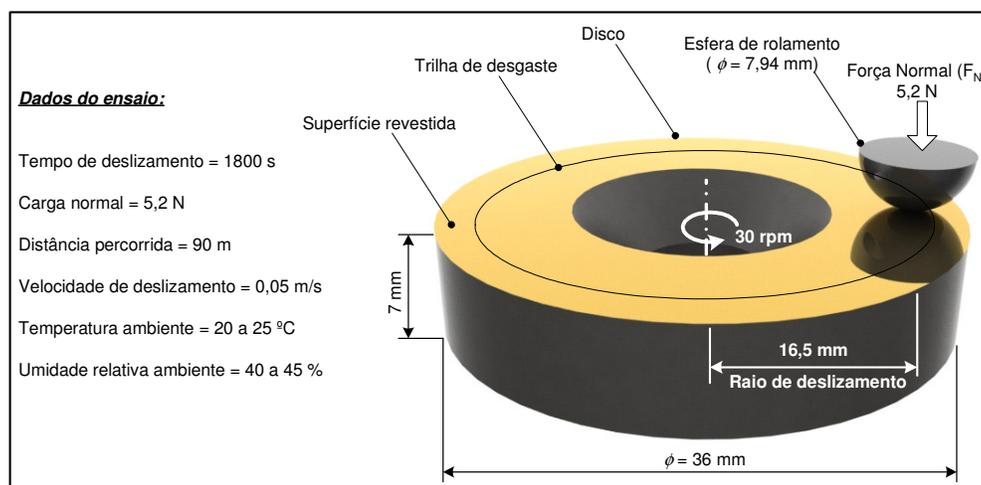
- tensão de polarização (Bias) em -40,0 VDC;
- potência aplicada ao catodo magnetron sputtering desbalanceado em 640 W;
- temperatura de deposição 300°C;
- pressão parcial de argônio em 3,0 mTorr;
- pressão base ou de fundo na câmara de deposição de 1x10<sup>-6</sup> Torr; e
- espessura da camada intermediária de Ti: ≈ 100 nm.

O filme multicobertura depositado sobre o aço AISI H13 nitretado, apresenta uma camada intermediária de Ti com aproximadamente 100 nm e um filme multicobertura com espessura de 2,7 μm, constituído por uma camada de TiC-Mole com 0,6 μm, seguida por uma camada de TiN com 0,8 μm e finalizando com uma última camada de TiC-Duro com 1,1 μm. A Figura 3 mostra a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da seção transversal do revestimento depositado em multicoberturas.



**Figura 3.** MEV da amostra multicobertura depositado sobre o aço AISI H13 nitretado por 2 h.

Após o tratamento de deposição, os discos foram submetidos a condições laboratoriais de desgaste por deslizamento e para isso foi utilizado um tribômetro da marca Plint & Partners, modelo TE67. Os ensaios de desgaste foram realizados a seco, numa sala com ambiente controlado a temperatura entre 20°C e 25°C e umidade relativa entre 40% a 45%. A força normal aplicada por um sistema de peso morto de 5,2 N foi transmitida ao disco por uma esfera de aço AISI 52100 com diâmetro de 7,94 mm. Nesta configuração de ensaio de desgaste o disco gira no sentido anti-horário a 30 rotações por minuto, o que resulta numa velocidade de deslizamento linear de 0,05 m/s para a região onde foi realizado o ensaio. O tempo total de ensaio foi de 1.800 s. Nestas condições, para cada um dos quatro revestimentos, foram realizadas três repetições. Além disso, foram testados discos somente nitretados e discos somente temperados e revenidos (estes receberão a seguinte nomenclatura – Nitretados e TeR, respectivamente). A Figura 4 mostra uma representação esquemática da configuração do ensaio de desgaste utilizada neste trabalho.



**Figura 4.** Representação da configuração esfera-sobre-disco e descrição das variáveis do ensaio.

O tribômetro utilizado possui um sistema capaz de medir a força resistente ao movimento de deslizamento do disco sob a esfera numa frequência de 10 Hz, o que resultou numa aquisição de aproximadamente 20 pontos por volta de deslizamento. Antes do início do ensaio de desgaste a esfera foi limpa o que consistiu em imergi-la num béquer com álcool e este num banho ultrassônico por 180 s. Os discos nitretados e os discos revestidos, por sua vez, não passaram pelo processo de limpeza, exceto aquele somente temperado e revenido, que foi limpo nas mesmas condições da esfera.

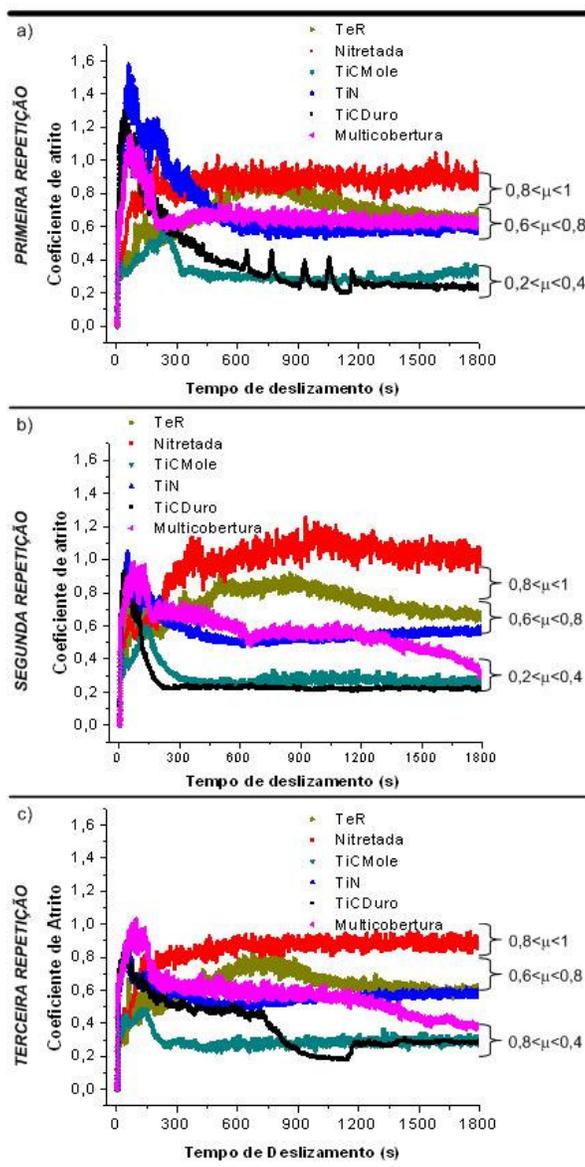
Após o final do ensaio as esferas e os discos foram fotografados em sua área de contato e tanto um como outro não foram limpos. Este procedimento foi adotado para caracterizar as partículas de desgaste que foram coletadas e coladas numa fita condutora o que possibilitou analisá-las num microscópio eletrônico de varredura, marca Phillips XL30, que possui sonda acoplada para análise dos elementos químicos por EDS (Energy Dispersive System).

Além das caracterizações com as técnicas de microscopia utilizou-se também a perfilometria de contato na caracterização da trilha de desgaste dos discos com o perfilômetro de contato da marca Kosaka Lab modelo Surfcoorder 1700α. O perfilômetro foi igualmente utilizado para medir a rugosidade média e o perfil

topográfico da trilha de desgaste do disco. Para as medidas de rugosidade utilizou-se um filtro de Gauss enquanto que o perfil da trilha foi obtido sem filtro. A resolução do perfilômetro para as medidas de rugosidade foi de  $0,0005\ \mu\text{m}$  enquanto que para o perfil da trilha de desgaste foi de  $0,005\ \mu\text{m}$ . Os parâmetros utilizados para estas medidas foram os seguintes: para os discos TeR e Nitretada foi utilizado um comprimento amostral (cutoff) de  $0,08\ \text{mm}$  e comprimento de medição de  $0,4\ \text{mm}$ . Com os discos TiN, TiC-Mole, TiC-Duro, e Multicobertura foi utilizado um cutoff de  $0,25\ \text{mm}$  e comprimento de medição de  $1,25\ \text{mm}$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 apresenta os gráficos de coeficiente de atrito (força aparente de atrito/força normal) em função do tempo de deslizamento para todos os discos e suas repetições.



**Figura 5.** Curvas de atrito dos discos testados; a), b) e c) período completo de ensaio da 1ª, 2ª e 3ª repetições, respectivamente.

De modo geral, pode ser observado que nas condições estudadas os discos podem ser classificados em três níveis de coeficiente de atrito, que são:

$0,8 < \mu < 1,0$  – Nitretada;

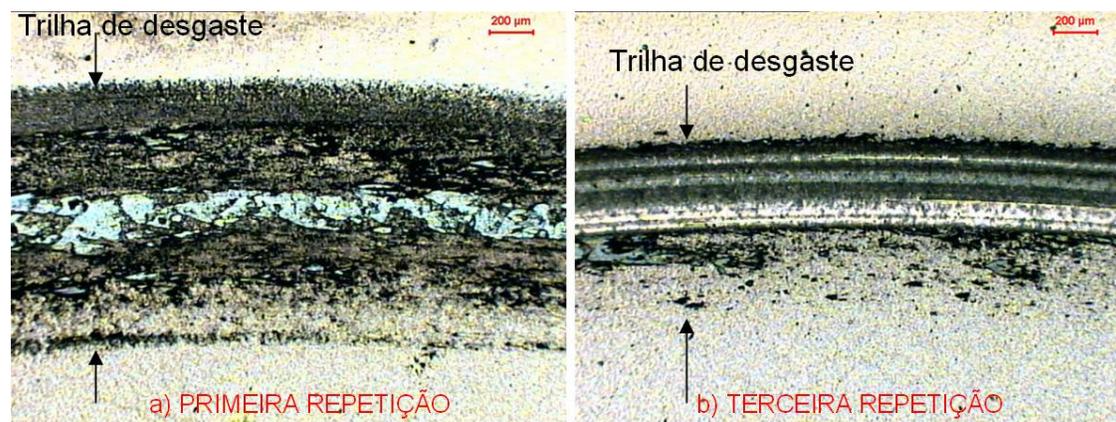
$0,6 < \mu < 0,8$  – TeR e TiN;

$0,2 < \mu < 0,4$  – TiC-Mole, TiC-Duro e Multicobertura.

Esta classificação não se aplica à primeira repetição do ensaio com o disco Multicobertura, mas à 2ª e 3ª repetição nas quais observou-se uma redução gradativa do coeficiente de atrito de aproximadamente 0,6, após 1200 s, para 0,2, no final do ensaio. A diferença de comportamento do disco da primeira repetição pode ser atribuída à provável variação da espessura dos filmes que compõem a Multicobertura.

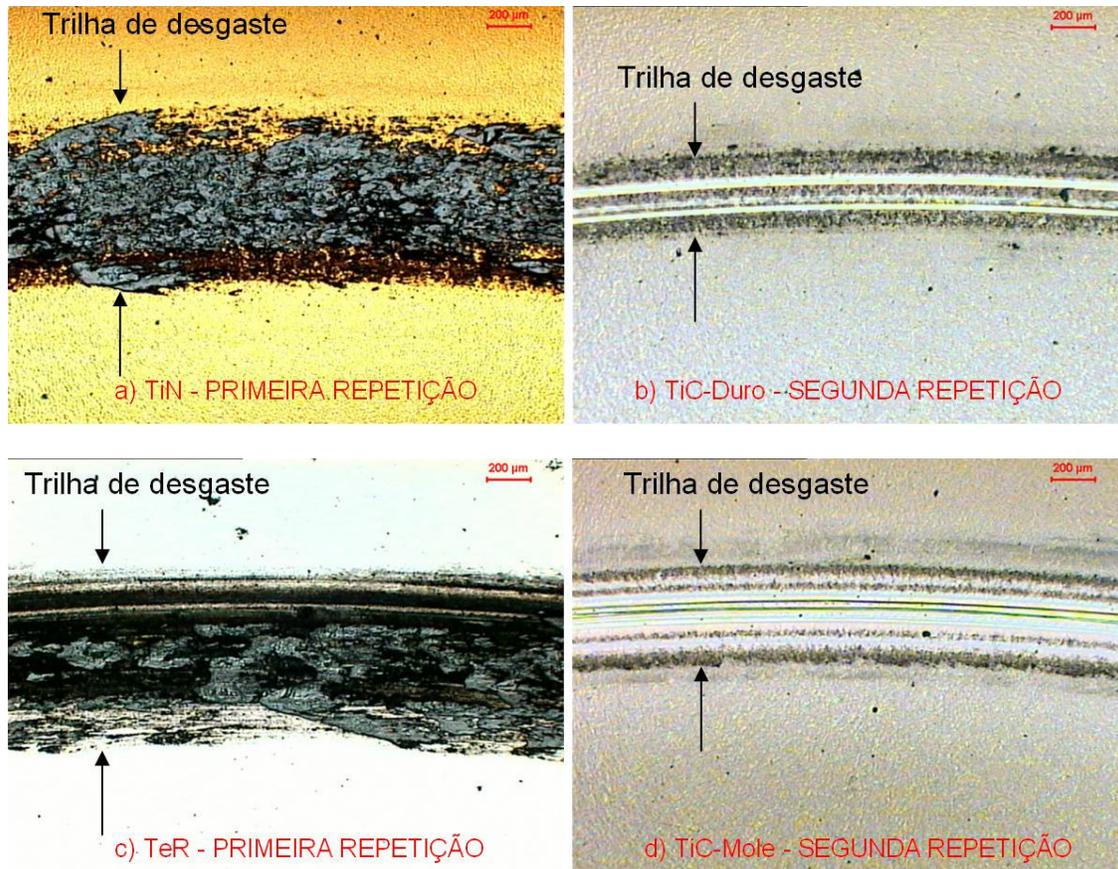
Outro fato a ser destacado na terceira repetição série de repetições é que a curva do coeficiente de atrito do disco TiC-Duro não seguiu as características iniciais das repetições anteriores pelo menos até aproximadamente 750 s.

Assim como houve diferença nos valores finais do coeficiente de atrito entre os discos multicobertura houve também diferenças nas suas trilhas de desgaste. A Figura 6 apresenta a diferença entre a trilha de desgaste do disco multicobertura da primeira repetição com o da terceira repetição.



**Figura 6.** Trilhas de desgaste dos discos multicobertura. a) Primeira repetição,  $\mu = 0,6$ ; b) Terceira repetição,  $\mu = 0,2$ .

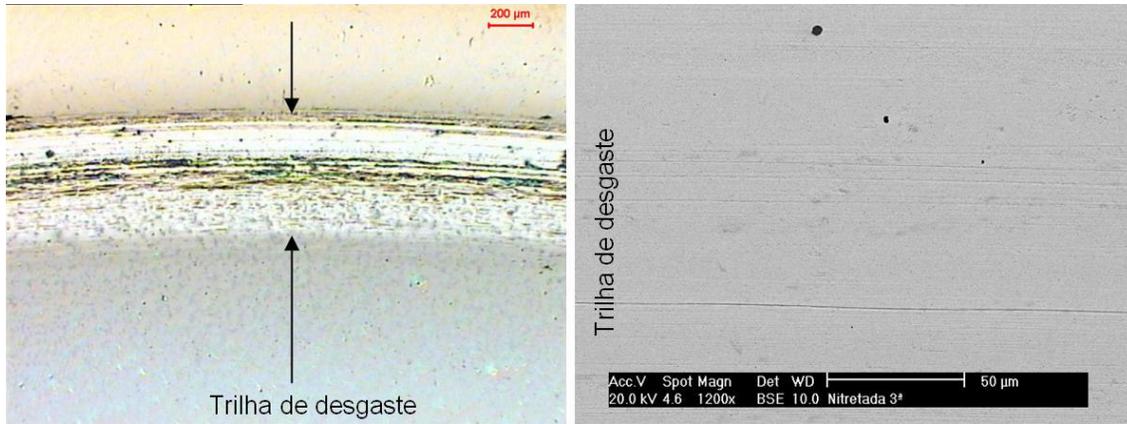
A Figura 7 apresenta as trilhas de desgaste do disco TiN da primeira repetição ( $\mu = 0,6$ ) e do disco TiC-Duro da segunda repetição ( $\mu = 0,2$ ). Observa-se algumas semelhanças ao se comparar as trilhas dos discos multicobertura da primeira e terceira repetições com os discos TiN e TiC-Duro respectivamente.



**Figura 7.** Trilhas de desgaste do disco TiN – primeira repetição (a), do disco TiC-Duro – segunda repetição (b), do disco TeR – primeira repetição (c) e do disco TiC-Mole – segunda repetição (d).

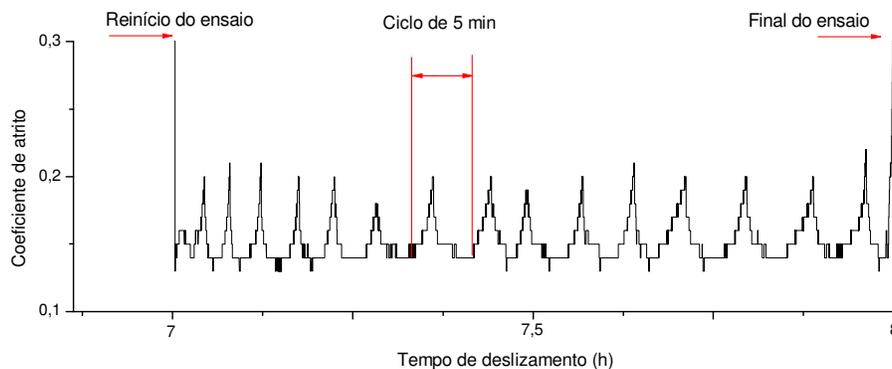
A comparação entre as trilhas de desgaste das Figuras 6(a), 7(a) e 7(c) permitem identificar alguns pontos em comum que são: i/ a presença de óxidos aderidos sobre a trilha, identificados por MEV e EDS, e ii/ a largura das trilhas de desgaste, indicadas pelas setas. Da mesma forma, há também pontos em comum entre as trilhas de desgaste apresentadas nas Figuras 6(b), 7(b) e 7(d) que são: i/ a ausência de óxidos aderidos sobre a trilha, quando observados em MEV e EDS, e ii/ a largura das trilhas de desgaste, indicadas pelas setas, que são sempre menores do que aquelas das Figuras 6(a), 7(a) e 7(c).

Além dos pontos em comum apresentados anteriormente entre as Figuras 6(a), 7(a) e 7(c) foi possível identificar também que o valor do coeficiente de atrito no instante final do ensaio dessas respectivas condições foi de 0,6 a 0,8. Por outro lado, os ensaios com os discos Multicobertura da 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> repetições (Figura 6b), TiC-Duro (Figura 7b) e TiC-Mole (Figura 7d) que não apresentaram óxidos no interior das trilhas de desgaste o valor final de coeficiente de atrito foi de 0,2. Estes resultados podem indicar uma relação entre a presença de óxidos aderidos a superfície da trilha de desgaste com valores elevados de atrito e, quando da ausência de óxidos, os valores do coeficiente de atrito são menores. Porém, as trilhas de desgaste dos discos nitretados não apresentaram óxidos aderidos, ver Figura 8, e o valor do coeficiente de atrito foi o mais elevado ( $\mu > 0,8$ ).



**Figura 8.** Trilha de desgaste do disco nitretado 3ª repetição. a) imagem obtida por microscopia óptica e b) por MEV com elétrons retroespalhados.

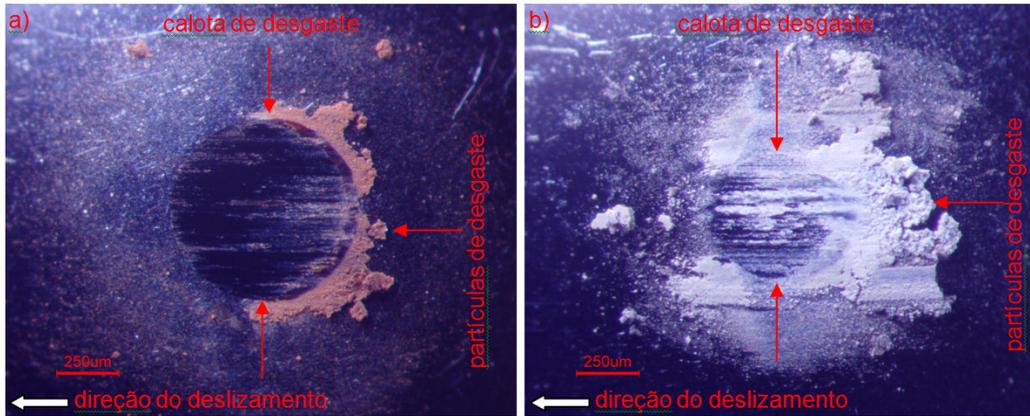
Apesar da divergência entre os pesquisadores que atribuem à nitretação a vantagem de reduzir o atrito<sup>(7)</sup> com aqueles que encontraram valores elevados,<sup>(9)</sup> sabe-se, com trabalhos anteriores,<sup>(10)</sup> que há uma forte dependência do coeficiente de atrito com as partículas de desgaste. Naquele estudo foi possível mostrar que ao remover as partículas de desgaste do contato o valor do coeficiente de atrito atingiu valores mínimos de 0,15, em condições de deslizamento a seco de uma esfera de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  sobre um disco de AISI H13 nitretado com carga normal de 800 N e velocidade linear de 0,05 m/s.<sup>(10)</sup> A Figura 9 mostra o efeito da remoção das partículas de desgaste no coeficiente de atrito do par citado.



**Figura 9.** Curva do coeficiente de atrito para o par  $\text{Si}_3\text{N}_4$ /AISI H13 nitretado durante ensaio de desgaste por deslizamento a seco.<sup>(10)</sup>

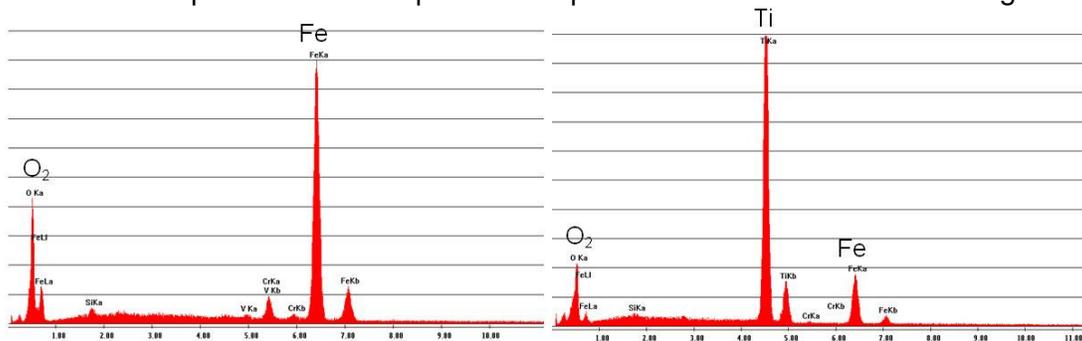
Segundo os autores,<sup>(10)</sup> cada pico na curva do coeficiente de atrito da Figura 9 corresponde ao instante em que as partículas de desgaste foram removidas por ação mecânica, por um determinado período de tempo, até atingir os valores mínimos de 0,15.

A Figura 10 mostra a calota de desgaste das esferas utilizadas no ensaio com os discos nitretados (a) e TiC-Mole (b), ambas da terceira repetição. As imagens das calotas foram obtidas em um estereoscópio, onde se teve o cuidado de manter constante a distância focal e intensidade luminosa para permitir comparações entre as calotas dos diferentes pares ensaiados.



**Figura 10.** Calota de desgaste. a) calota do ensaio com o disco nitretado 3ª e b) calota do ensaio com o disco TiC-Mole 3ª.

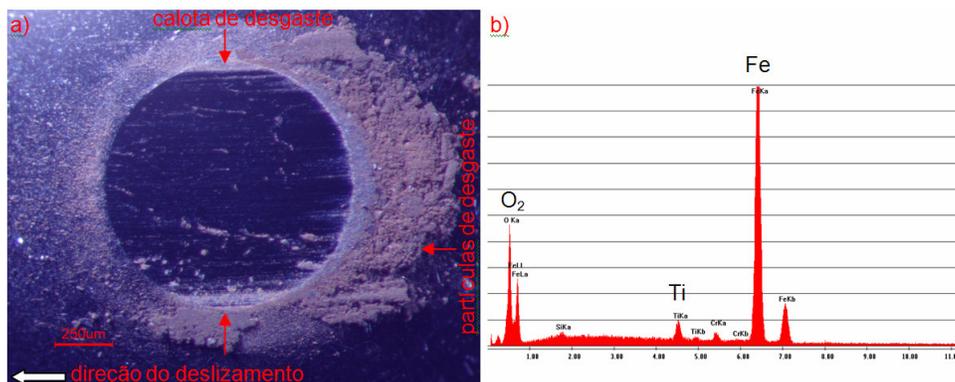
Análises por EDS dessas partículas apresentaram os resultados da Figura 11.



**Figura 11.** Análise por EDS das partículas de desgaste. a) partículas de desgaste do ensaio com o disco nitretado da 3ª repetição e b) partículas de desgaste do ensaio com o disco TiC-Mole 3ª repetição.

Os espectros da Figura 11b indicam a presença de Ti e O<sub>2</sub> nas partículas de desgaste dos ensaios com os discos TiC-Mole. Resultados semelhantes foram encontrados com os discos TiC-Duro e Multicobertura da 2ª e 3ª repetições. Já na Figura 11a observa-se que não há Ti nas partículas de desgaste dos discos nitretados, e que predomina a presença de Fe e O<sub>2</sub>.

A Figura 12(a) apresenta a calota de desgaste da esfera utilizada no ensaio do disco TiN da 3ª repetição e a Figura 12(b) a análise por EDS de suas partículas de desgaste.

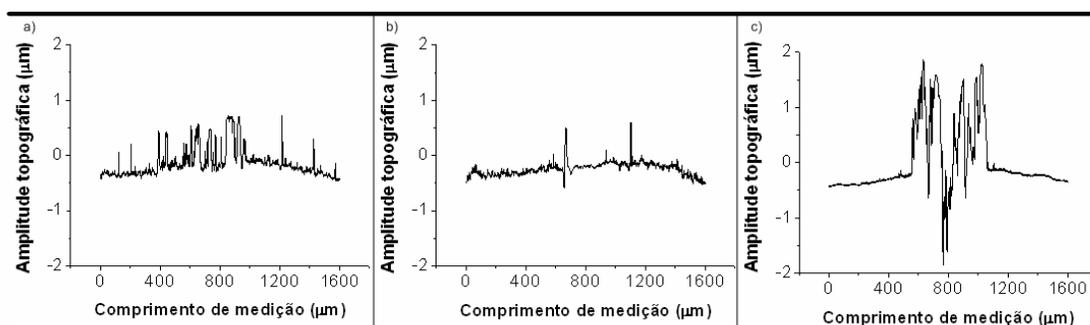


**Figura 12.** a) Calota de desgaste da esfera que deslizou contra o disco TiN da 3ª repetição. b) Análise por EDS das partículas de desgaste do ensaio com o disco TiN 3ª repetição.

Observa-se na Figura 12(a) que o diâmetro da calota de desgaste é maior quando comparada com as demais condições. Na Figura 12(b) os principais elementos identificados foram: O<sub>2</sub>, Ti e Fe, porém, este último elemento deve ser encontrado numa proporção maior uma vez que o maior desgaste da esfera resulte numa maior concentração de Fe que a de Ti, pois a principal fonte de Ti, o filme de TiN, não sofre desgaste perceptível para as ferramentas de análise utilizadas neste trabalho.

Estes resultados permitem formular a seguinte hipótese: a presença de partículas de desgaste rica em Fe resulta em valores de coeficiente de atrito maiores que aqueles onde nas partículas de desgaste predomina a presença de Ti. Esta hipótese é baseada na possibilidade de que o Fe e o Ti se liguem ao O<sub>2</sub> para formar óxidos com maior e menor potencial iônico respectivamente que de acordo com Erdemir,<sup>(11)</sup> devido ao baixo potencial iônico, o óxido de ferro deve apresentar um coeficiente de atrito maior que o óxido de titânio. Porém, para confirmar esta hipótese, deverão ser realizadas caracterizações mais detalhadas destas partículas de desgaste.

Os perfis topográficos das trilhas de desgaste não foram utilizados para quantificar o desgaste, pois as alterações topográficas resultantes do desgaste só foram perceptíveis no nível de rugosidade, exceto a trilha de desgaste dos discos TeR. A Figura 13 apresenta os perfis topográficos das trilhas de desgaste dos discos TiN (a), TiC-Duro (b) e TeR (c).



**Figura 13.** Perfis topográficos das trilhas de desgaste. a) disco TiN 1ª repetição, b) disco TiC-Duro 1ª repetição e c) disco TeR 1ª repetição.

## 4 CONCLUSÃO

Os discos que apresentaram melhor desempenho tribológico, isto é, aqueles com baixos valores de coeficiente de atrito, foram os discos TiC-Mole e TiC-Duro. Os discos multicobertura podem apresentar os mesmos níveis baixos do coeficiente de atrito, mas somente quando a camada intermediária de TiN não for predominante sobre o processo de desgaste.

O comportamento tribológico do filme de TiN apresenta um coeficiente de atrito maior que 0,6 e a trilha de desgaste se apresenta com óxidos aderidos. Comportamento semelhante ao do disco TeR.

O atrito mais elevado foi aquele observado com o disco nitretado, nesta condição é evidente o efeito das partículas de desgaste.

Para todas as condições estudadas as partículas de desgaste aparentam ter um papel de grande influência no atrito, pode ser observado que quanto maior a quantidade de óxidos de ferro (baixo potencial iônico) nas partículas de desgaste maior é o valor do atrito. Nos casos onde o atrito foi baixo, o desgaste da esfera foi o

menor e portanto havia nas partículas de desgaste quantidade maior de óxidos de titânio (potencial iônico maior que o potencial iônico do óxido de ferro, ou seja, menor atrito).

Trabalhos futuros serão realizados com o objetivo de caracterizar com mais detalhe os óxidos de ferro e titânio das partículas de desgaste e aqueles aderidos sobre as trilhas de desgaste.

### **Agradecimentos**

À Villares Rolls e a FAPESP pelo apoio financeiro na forma do processo de auxílio a pesquisa número 05/51705-8.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 SCOPUS. Disponível em: < <http://www.scopus.com/scopus/home.url>> Acesso em: 30 jan. 2009.
- 2 DONNET, D., ERDEMIR, A. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 180-181, 2004, p. 76-84.
- 3 RECCO, A. A. C. Estudo da obtenção e das propriedades dos filmes de TiN e TiC depositados sobre aços ferramentais AISI H13 e D2 nitretados e não nitretados. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008, p. 172.
- 4 BLAU, P.J. The significance and use of the friction coefficient. *Tribology International*, Vol. 34. 2001. P. 585-591.
- 5 TANAKA, D.K., SINATORA, A. As leis do Atrito: da Vinci, Amontou ou Coulomb. *Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas*, 12, 2007. p. 31-34.
- 6 FONTANA, L.C., MUZART, J.L.R. Triode magnetron sputtering TiN film deposition. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 114, 1999, p. 7-12.
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Friction, Lubrication and Wear Technology. In: *Metals Handbook*, Vol. 18. 1992. p. 942.
- 8 KARAMIS, M. B. An investigation of the properties and wear behaviour of plasma-nitrided hot-working steel (H13). *Wear*, Vol. 150, 1991. p. 331-342.
- 9 KARAOGLU, S. Structural characterization and wear behaviour of plasma-nitrided AISI 5140 low alloy steel. *Materials Characterization*, Vol. 49, 2003. p. 349-357.
- 10 LEITE, M.V., FIGUEROA, C. A., BAUMVOL, I.J.R., BASSO, R.L.O., MEI, P.R., SINATORA, A. Relação entre as propriedades tribológicas e a microestrutura do aço ABNT H13 nitretado por plasma pulsado. *Anais do VI Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes*, 2008, p. 12.
- 11 ERDEMIR, A. A crystal chemical approach to the formulation of self-lubricating nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, 2005, p. 1792-1796.