

# EFEITOS DE DIFERENTES CAMADAS NITRETADAS POR PLASMA NO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE REVESTIMENTOS DIAMOND LIKE CARBON (DLC)\*

Pedro Henrique Teshima Shioga<sup>1</sup>  
Cristiano Binder<sup>2</sup>  
Gisele Hammes<sup>3</sup>  
Aloisio Nelmo Klein<sup>4</sup>  
Jose Daniel Biasoli de Mello<sup>5</sup>

## Resumo

Quando processos de engenharia de superfícies multifuncionais que combinam fases de propósito orientadas são aplicados a substratos moles, uma combinação de alta resistência ao desgaste, suporte de alta carga e baixos coeficientes de atrito podem ser obtidos. Neste estudo, os efeitos de diferentes camadas nitretadas no comportamento tribológico de revestimento Diamond-Like-Carbon (DLC) depositado sobre aço SAE 1040 são investigados. A nitretação foi conduzida sob diferentes temperaturas e misturas de gases para criar três camadas de nitretos distintas: duas camadas de compostos com predominância de fases  $\epsilon$  e  $\gamma'$  e uma camada de difusão. Todas as superfícies foram então revestidas com DLC, depositado via Plasma-Enhanced-Chemical-Vapour-Deposition (PACVD). As fases de nitreto foram analisadas utilizando difração de raios-X e a topografia da superfície foi analisada por interferometria de luz branca e microscopia eletrônica de varredura. O comportamento tribológico foi investigado utilizando esfera e plano com movimento alternado com carregamento incremental até a falha do filme DLC. Os testes tribológicos indicaram que o melhor desempenho foi alcançado por uma específica combinação de dureza, rugosidade superficial e tipo de nitreto. A melhor capacidade de mancalização entre o revestimento DLC e o substrato mole foi alcançada quando a camada de nitretos constitui-se apenas de uma camada de difusão.

**Palavras-chave:** DLC; Nitretação; Rugosidade; Atrito; Adesão.

## EFFECTS OF DIFFERENT PLASMA NITRIDE LAYERS ON THE TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF DLC COATINGS

### Abstract

When multifunctional surface engineering processes that combine purpose-oriented phases are applied to soft substrates, a combination of high wear resistance, high load support and low coefficients of friction can be achieved. In this study, the effects of different nitride layers on the tribological behaviour of a diamond-like carbon (DLC) film deposited on a SAE 1040 steel were investigated. The nitriding was carried out under different temperatures and gas mixtures to create three distinct nitride layers: two compound layers with predominant  $\epsilon$  and  $\gamma'$  phases and a diffusion layer. All of the surfaces were then coated with DLC deposited via plasma-enhanced chemical vapour deposition (PACVD). The nitride phases were analysed using X-ray diffraction, and the surface topography was analysed by white-light interferometry and scanning electron microscopy. The tribological behaviour was evaluated using a ball on a reciprocating plane with incremental loading until each DLC film failed. The tribological tests indicated that the best performance was achieved for a specific combination of hardness, surface roughness and nitride type. The best load-bearing capacity between the DLC coating and the soft substrate was achieved when the nitride layer was primarily a diffusion layer.

**Keywords:** DLC; Nitriding; Roughness; Friction; Adhesion.

<sup>1</sup> Engenheiro mecânico, mestre, pesquisador, Depto. de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro químico, doutor, pesquisador, Depto. de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

<sup>3</sup> Eng. de materiais, doutor, pesquisador, Depto. de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

<sup>4</sup> Físico, Dr.-Ing., professor coordenador, Depto. de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

<sup>5</sup> Eng. mecânico, PhD, professor visitante, Depto. de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Diamond-Like-Carbon (DLC) engloba uma família de revestimentos com larga utilização em aplicação tribológicas devido a seus baixos coeficientes de atrito em pares metal-DLC (usualmente  $0,1 < \mu < 0,2$ , mas valores tão baixos como 0,01 foram reportados) [1-3], e são associados a extremamente baixas taxas de desgaste ( $10^{-9}$ - $10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm) [3-4].

Revestimentos duros de lubrificação sólida encontraram sucesso em muitas aplicações, particularmente aquelas envolvendo elementos puros como silício e materiais avançados [5-8]. Outros sistemas utilizam substratos relativamente duros, como aços endurecidos [9]; entretanto produções industriais de larga escala utilizam materiais moles, simples e baratos como substratos para os revestimentos DLC, e que requerem superfícies multifuncionais para suporte mecânico e adesão química. Uma solução que envolve progressivamente aumentar a dureza superficial e criar um suporte mecânico é a nitretação a plasma, um tratamento termoquímico difusivo que aumenta a dureza superficial de aços e ligas metálicas [10-11]. Em contraste com outros tratamentos superficiais como a nitretação gasosa, nitretação por banho de sal, carbonitretação e nitrocarbonetação [12-15], a nitretação a plasma não induz transformação de fase e apenas modifica as propriedades superficiais, portanto produz mínimas distorções dimensionais nas peças tratadas, e que são normalmente causadas por alívio de tensões se temperaturas acima de 600°C são utilizadas [10]. Portanto, nitretação a plasma é uma técnica interessante utilizada para produzir revestimentos multicamadas para componentes empregados em aplicações de alta precisão. Além disto, este processo gera poucos resíduos, requer poucos insumos e é mais simples de controlar comparado com outros processos de nitretação [16]. Além disto, os custos do processo são compatíveis com os níveis exigidos pela indústria [10,17-18].

O revestimento resultante é composto por duas camadas principais: uma camada composta externa com altos valores de dureza e uma camada de difusão com dureza que decresce em direção ao núcleo do material. Durante a nitretação a plasma, esta estrutura de camadas de nitretos é alcançada através da aceleração de íons de nitrogênio contra a superfície da amostra, limpando a superfície, aquecendo a peça e provendo nitrogênio ativo que difunde na matriz [19-20]. Este bombardeamento também modifica as características topográficas da amostra [10], aumentando a rugosidade para faixas micrométricas [21-22] e afeta diretamente o suporte mecânico do DLC [8,23].

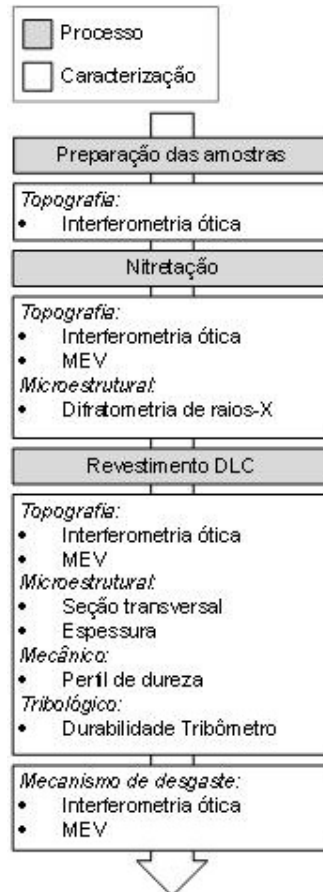
Dependendo das variáveis de controle aplicados a este processo, particularmente a temperatura e a mistura de gases, diferentes fases de nitreto com distintas características podem ser estabilizadas [20]. Estudos preliminares reportaram superfícies com diferentes perfis de dureza e espessuras para diferentes misturas de gases [22]. Outro estudo mostrou que a nitretação altera significamente a rugosidade da superfície. A rugosidade inicial pode também afetar a espessura das camadas nitretadas [24].

Devido à natureza multifuncional da superfície, todos estes fatores podem significamente afetar a adesão do DLC, afetando o desempenho tribológico.

Neste estudo, o relacionamento entre os parâmetros de nitretação, rugosidade superficial e o desempenho tribológico foi analisado. Em particular, revestimentos multipropósitos (diferentes camadas nitretadas e DLC) foram caracterizados por análise de topografia 3D e testes de deslizamento alternado.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Três camadas nitretadas com diferentes características foram produzidas: uma camada composta com predominância de fase  $\epsilon$ , uma camada composta com predominância de fase  $\gamma'$  e uma camada de difusão apenas. Estas superfícies foram então revestidas com o mesmo DLC. Estas superfícies multifuncionais são referenciadas como  $\epsilon$ ,  $\gamma'$  e difusão. A figura 1 apresenta os processos e as técnicas de caracterização utilizadas neste trabalho.



**Figura 1.** Mapa de processos e caracterização utilizados no estudo

Os revestimentos multipropósitos foram depositados sobre aço carbono SAE1040, que é uma classe de material comumente utilizada na indústria mecânica. As amostras foram obtidas através do corte de uma barra de aço carbono SAE1040; uma das faces planas foi desbastada e polida a um valor  $S_q$  menor que  $0,05 \mu\text{m}$ . As amostras foram subsequentemente nitretadas em um reator a plasma sob três diferentes condições de processamento. Estas condições foram desenvolvidas em um estudo preliminar [11] e são apresentadas na tabela I. Um plasma foi produzido utilizando descarga elétrica no regime luminescente anormal com tensão de  $-500 \text{ V}$  aplicada às amostras por um sinal de onda quadrada com frequência de  $4 \text{ kHz}$  e um ciclo de trabalho de  $150 \mu\text{s}$ .

**Tabela 1.** Parâmetros utilizados na nitretação a plasma para a formação de três tipos de camada

Temperatura (°C)	Pressão (Torr)	Tempo (h)	Mistura de gás (%)	Fase esperada
550	2	1,5	90N <sub>2</sub> -9H <sub>2</sub> -1CH <sub>4</sub>	$\epsilon$
570	2	4,0	20N <sub>2</sub> -80H <sub>2</sub>	$\gamma'$
480	2	1,5	5N <sub>2</sub> -95H <sub>2</sub>	Difusão

As camadas de DLC foram obtidas via PECVD em duas etapas: uma envolvendo alta concentração de silício para adesão [25-26] e uma envolvendo apenas o precursor de hidrocarbonetos.

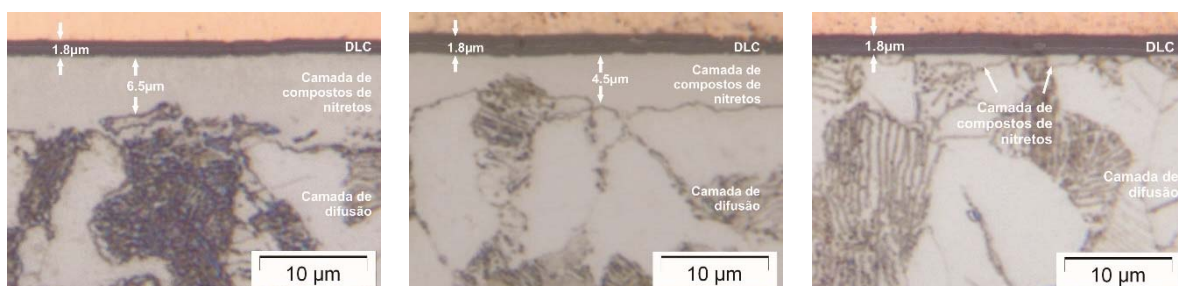
As fases de nitretos foram caracterizadas utilizando um difratômetro de raios-X com radiação  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$ ) e uma geometria Bragg-Bretano (40 kV - 30 mA).

A evolução da topografia das superfícies das amostras foi monitorada utilizando interferometria ótica de luz branca. Imagens 3D foram obtidas utilizando tamanhos de amostras de  $640 \times 480$  pontos com resolução lateral de  $0,28 \mu\text{m}$  e resolução vertical de  $0,1 \text{ nm}$ . As superfícies foram analisadas utilizando o software Mountains Map®. Após a remoção da forma, a ondulação foi subtraída utilizando um cut-off de  $25 \mu\text{m}$  e os parâmetros de rugosidade foram obtidos. Para complementar a análise da superfície, imagens de MEV das superfícies foram obtidas.

O comportamento tribológico dos revestimentos multipropósitos (DLC+camada nitretada) foi avaliado através de teste de durabilidade utilizando o método apresentado por de Mello and Binder [27]. Neste método, a superfície da amostra é sujeita a um movimento alternado sob uma força normal crescente até a falha do filme e o consequente aumento no atrito. Um tribômetro com movimento alternado (2 Hz) foi utilizado, e a carga inicial (7 N) foi aumentada em intervalos de 7 N; um contracorpo, especificamente uma esfera medindo 3 mm de diâmetro feita de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , em uma atmosfera de ar ambiente ( $25^\circ\text{C}$  e 60% de umidade relativa) foram utilizados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de processamento apresentados na tabela 1 produziram três tipos de superfície, como demonstrado pelas seções transversais das camadas retratadas na figura 2, onde a espessura da camada foi medida. Sob as duas condições, uma camada homogênea de camada composta foi formada. A profundidade da camada composta  $\epsilon$  foi aproximadamente  $6,5 \mu\text{m}$ , enquanto que na camada  $\gamma'$  foi aproximadamente  $4,5 \mu\text{m}$ . Notavelmente, a taxa de crescimento da camada  $\epsilon$  foi consideravelmente maior que a da camada  $\gamma'$ ; mesmo depois de incrementar o tempo de tratamento para a camada  $\gamma'$  em mais de 2,5 vezes o tempo original de tratamento, a camada formada foi 30% mais fina que a camada  $\epsilon$ . Na camada de difusão, uma pequena e não contínua de fase composta se formou na superfície. Sob todas as condições, agulhas de nitretos puderam ser observadas nas camadas de difusão,  $\epsilon$  e  $\gamma'$ , assim como sob a camada de compostos. A espessura do DLC também foi analisada para as três condições, que produziram espessuras de DLC de  $1,8 \mu\text{m}$ .

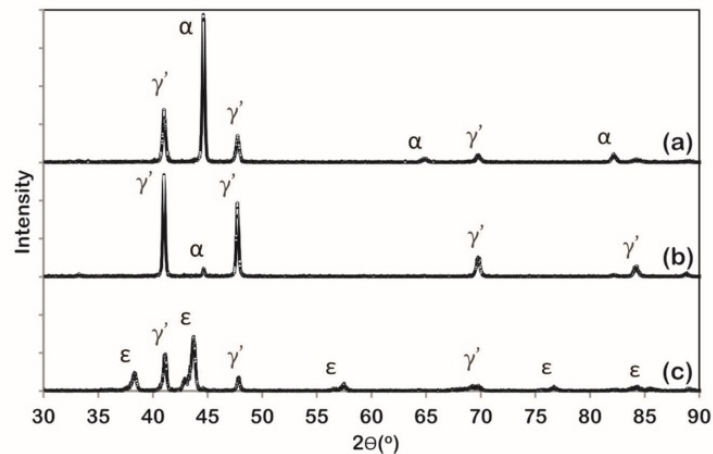


**Figura 2.** Seções transversais: (a) camada de compostos fase- $\epsilon$ ; (b) camada de compostos fase  $\gamma'$ ; (c) camada de difusão

Cada uma das superfícies foi analisada em um difratômetro de raios-X, revelando que as desejadas fases de nitretos foram obtidas, como mostram os difratogramas



apresentados na figura 3. A camada (a) apresentou picos de ferrita- $\alpha$  e  $\gamma'$ , devido à presença de pequenas formações não contínuas de nitreto  $\gamma'$  na superfície. A camada (b) continha apenas fase  $\gamma'$ . A camada (c) da figura exibiu uma combinação de fases  $\epsilon$  e  $\gamma'$ , com uma predominância da primeira.



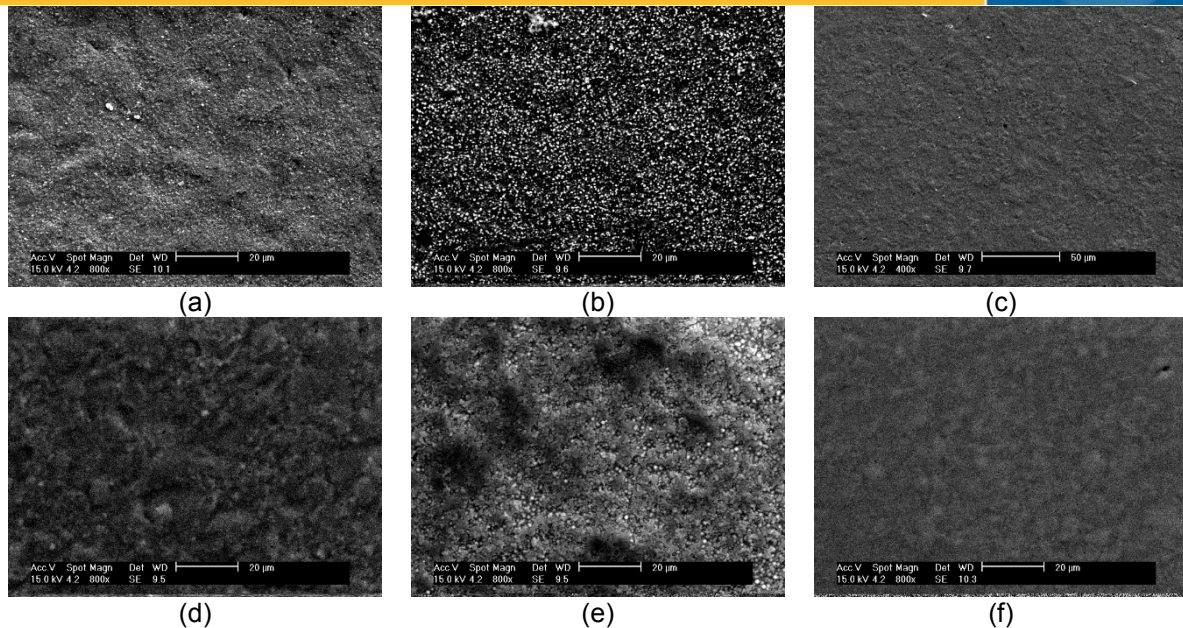
**Figura 3.** Difrátômetros de raios-X das três camadas nitretadas produzidas

O endurecimento superficial causado pela nitretação foi analisado utilizando perfis criados via microindentação Vickers com 50g de força, a primeira indentação foi medida na vista do plano e as medições seguintes foram realizadas no corte transversal com 10 $\mu$ m de espaçamento entre elas.

As duas camadas de compostos apresentaram o maior valor de dureza (880 HV), que rapidamente decaiu em 20  $\mu$ m para o valor de dureza do núcleo de 20  $\mu$ m.

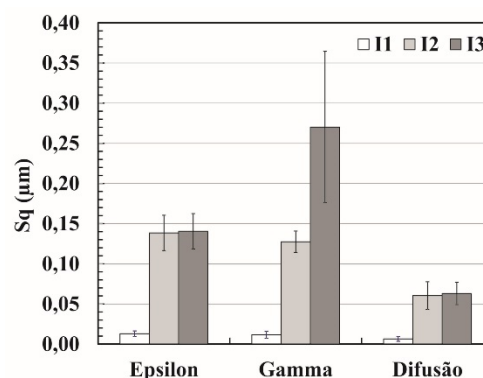
O desenvolvimento da superfície foi analisado por interferometria ótica e imagens de MEV apresentadas na figura 4. Em princípio, aparentemente as condições  $\epsilon$  e  $\gamma'$  geraram maiores modificações, particularmente na condição  $\gamma'$ . A formação de picos sobre um platô pode ser observada na superfície gerada pela condição de difusão.

As imagens de MEV mostram que as proporções de mistura gasosa claramente afetaram as características das superfícies resultantes. As condições para o crescimento apenas da camada de difusão são aquelas que produzem as menores modificações, seguidas das condições para a camada  $\epsilon$  e então a camada  $\gamma'$ . Sob as condições  $\gamma'$ , diversos pontos de carregamento eletrônico podem ser observados, em contraste com as observações realizadas para as duas outras condições. Esta diferença é principalmente atribuída ao mais longo tempo de tratamento; de acordo com Mason [28], 90% dos átomos pulverizados retornam para o cátodo depois de serem retrodifundidos, criando as estruturas reveladas pelo MEV. Comparando as imagens das camadas revestidas com as imagens das superfícies apenas nitretadas, o DLC copiou a topografia da superfície anterior nas condições  $\epsilon$  e difusão. Na imagem de MEV do filme produzido sob as condições  $\gamma'$ , a formação heterogênea pode ser observada por regiões com densificação e má formação do filme. Portanto, a topografia e a composição da camada  $\gamma'$  significativamente alteraram as condições de deposição do DLC.



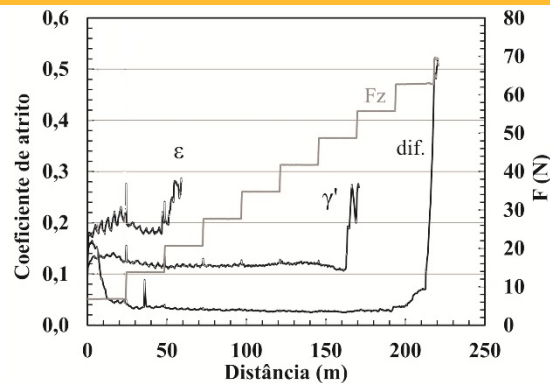
**Figura 4.** Imagens de MEV da superfície: (a) superfície fase- $\epsilon$ ; (b) superfície fase- $\gamma'$ ; (c) superfície difusão; (d) superfície fase- $\epsilon$  revestida; (e) superfície fase- $\gamma'$  revestida; (f) superfície difusão revestida

O parâmetro de rugosidade  $S_q$  prova a validade das observações iniciais do desenvolvimento das superfícies, como mostra a figura 5. Os dados são organizados com base nas condições e nas etapas de processamento: I1 – superfície polida; I2 – superfície nitretada; I3 – superfície revestida com DLC. O processo de nitretação aumenta a rugosidade em pelo menos uma ordem de magnitude em todas as condições. Como observado nas projeções, as condições  $\epsilon$  e  $\gamma'$  aumentaram a rugosidade por um fator de aproximadamente dois em relação às condições de difusão. Depois de revestir com DLC, a rugosidade das camadas  $\epsilon$  e difusão não foi modificada, ao contrário da camada  $\gamma'$ . Sob a condição  $\gamma'$ , a média de  $S_q$  aumentou.



**Figura 5.** Evolução de  $S_q$  ao longo do processo para os três tipos de camada. I1: superfície polida; I2: superfície nitretada; I3: superfície revestida com DLC

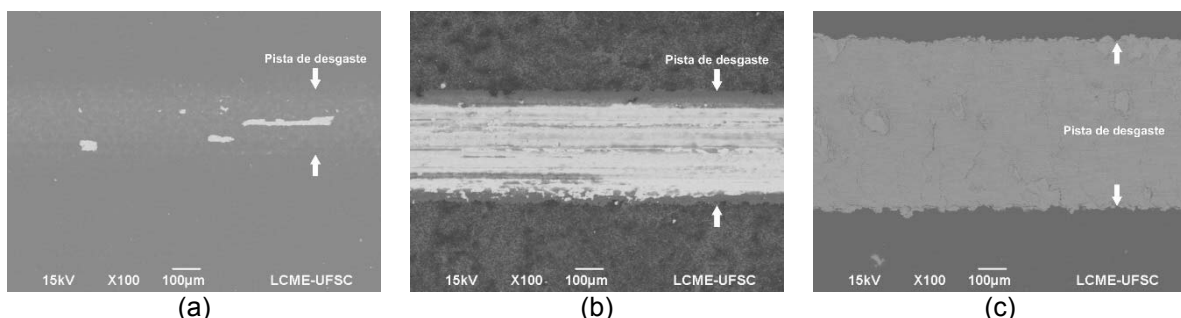
O comportamento das superfícies revestidas durante o teste de durabilidade é apresentado na figura 6. O coeficiente de atrito foi medido para cada condição até que o filme se rompesse; neste momento, um aumento abrupto no valor medido foi observado. Na figura 6, o coeficiente de atrito é traçado em preto, enquanto que a força incremental é traçada em cinza; os dois parâmetros são plotados em função da distância percorrida.



**Figura 6.** Teste de durabilidade em tribômetro com movimento alternado e incremento de carga normal, para as três condições

A evolução do coeficiente de atrito (COF) no gráfico mostra claramente que cada condição apresentou comportamentos tribológicos diferentes. O melhor desempenho tribológico foi alcançado pelo revestimento DLC sobre a camada de difusão, com uma durabilidade de 13.000 Nm e o menor COF (aproximadamente 0,05). A camada  $\epsilon$  revestida foi a segunda melhor, apresentando durabilidade de aproximadamente 6.000 Nm e um COF inicial de 0,125 que suavemente decresceu até 0,1. O pior desempenho foi obtido com a camada  $\gamma'$  revestida; este sistema falhou no início do teste, exibindo durabilidade de 600 Nm e o maior COF (0,2).

Para entender estes resultados, as pistas de desgaste foram analisadas; as correspondentes imagens são apresentadas na figura 7. Como demonstrado pelo desenvolvimento do coeficiente de atrito, as pistas de desgaste foram diferentes. No final dos testes, quando o coeficiente de atrito cresce rapidamente, uma tribocamada persistiu na camada  $\epsilon$ , com pequenas regiões contendo substrato aparente. Na camada  $\gamma'$ , uma tribocamada foi desenvolvida antes de ser removida, revelando o substrato. Faixas visíveis desta camada puderam ser observadas ao final do teste. Para a camada de difusão, que alcançou a mais longa distância de deslizamento, o filme foi completamente removido e a interface entre a pista de desgaste e a borda do revestimento é bem definida. Pequenas porções sob o DLC também foram removidas devido às maiores tensões. Em adição, a largura da pista é maior devido ao maior carregamento normal.



**Figura 7.** Imagens de MEV das pistas de desgaste: (a) superfície fase- $\epsilon$  revestida; (b) superfície fase- $\gamma'$  revestida; (c) superfície difusão revestida

Uma análise das três imagens e os resultados revelaram que a formação heterogênea do DLC sobre a camada nitretada  $\gamma'$  foi rapidamente removida durante o teste de deslizamento.

A camada  $\epsilon$  revestida, que também exibiu uma grande rugosidade com formação de DLC homogêneo, demonstrou uma durabilidade maior; ao final no teste, a tribocamada permaneceu no local, mesmo que algumas partes foram removidas.

Não obstante, nas condições de camada de difusão revestida ocorreu a maior durabilidade.

Os resultados mostram que a topografia e o tipo de camada nitretada utilizada afetam diretamente o desempenho do DLC. O controle topográfico se mostra importante por que utilizando condições ideais de rugosidade melhoram o suporte mecânico sem afetar negativamente o desempenho do sistema tribológico.

#### 4 CONCLUSÃO

Observou-se que a rugosidade afeta o desempenho tribológico dos filmes de DLC depositados sobre camadas nitretadas. Dependendo das condições de processo e camadas nitretadas resultantes, a durabilidade foi aumentada e o coeficiente de atrito reduzido. A melhor condição para este sistema envolveu depositar o DLC sobre a camada nitretada de difusão.

Revestimentos DLC podem ser afetados pela formação de uma camada composta de nitretos, neste caso revestir uma camada  $\gamma'$  formou um filme heterogêneo.

As condições de processamento utilizadas para criar as camadas de compostos  $\epsilon$  e  $\gamma'$  aumentaram a rugosidade da superfície por um fator de aproximadamente dois em relação àquelas utilizadas para criar apenas a camada de difusão.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem as seguintes agências brasileiras por financiarem a pesquisa: CNPq, BNDES, CAPES-PROEX and Whirlpool/Embraco.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Donnet C, Erdemir A. Tribology of diamond-like carbon films: Fundamentals and applications, Springer US, New York, 2008.
- 2 Erdemir A, Eryilmaz OL, Nilufer IB, Fenske GR. Effect of source gas chemistry on tribological performance of diamond-like carbon films, Diamond and Related Materials, 9 (2000) 632-637.
- 3 Erdemir A, Eryilmaz OL, Fenske G. Synthesis of diamondlike carbon films with superlow friction and wear properties, Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films, 18 (2000) 1987-1992.
- 4 Grill A. Tribology of diamondlike carbon and related materials: An updated review, Surface and Coatings Technology, 94-95 (1997) 507-513.
- 5 Buršíková V, Navrátil V, Zajíčková L, Janča J. Temperature dependence of mechanical properties of DLC/Si protective coatings prepared by PECVD, Materials Science and Engineering A, 324 (2002) 251-254.
- 6 Dorner A, Schürer C, Reisel G, Irmer G, Seidel O, Müller E. Diamond-like carbon-coated Ti6Al4V: influence of the coating thickness on the structure and the abrasive wear resistance, Wear, 249 (2001) 489-497.
- 7 Horiuchi T, Yoshida K, Okuda T, Kano M, Kumagai M, Suzuki T. Session 01: DLC coatings OA 01 P2009-245 evaluation of adhesion strength and wear resistance of DLC films, Surface and Coatings Technology, 205 (2010) S188-S195.
- 8 Dalibon EL, Charadia R, Cabo A, Trava-Airoldi V, Brühl SP. Evaluation of the mechanical behaviour of a DLC film on plasma nitrided AISI 420 with different surface finishing, Surface and Coatings Technology, 235 (2013) 735-740.
- 9 Rechberger J, Brunner P, Dubach R. High performance cutting tools with a solid lubricant physically vapour- deposited coating, Surface and Coatings Technology, 62 (1993) 393-398.



- 10 Pye D. Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing, ASM International, Materials Park, 2003.
- 11 De Mello JDB, Binder C, Binder R, Klein AN, Effect of nature of nitride phases on microabrasion of plasma nitrided sintered iron, Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces, 4 (2010) 191-196.
- 12 Campagna V, Bowers R, Northwood DO, Sun XC, Bauerle P. Comparison of carbonitriding and nitrocarburising on size and shape distortion of plain carbon SAE 1010 steel, Surface Engineering, 27(2) (2013) 86-91.
- 13 Christiansen T, Somers MAJ. Controlled dissolution of colossal quantities of nitrogen in stainless steel, Metallurgical and Materials Transactions A, 37 (2006) 675-682.
- 14 Funatani K. Low-Temperature Salt Bath Nitriding of Steels, Met. Sci. Heat Treat. 46 (2004) 277-281.
- 15 Wu D, Kahn H, Dalton JC, Michal GM, Ernst F, Heuer AH, Orientation dependence of nitrogen supersaturation in austenitic stainless steel during low-temperature gas-phase nitriding, Acta Mater. 79 (2014) 339-350.
- 16 Spalvins T. Tribological and microstructural characteristics of ion-nitrided steels, Thin Solid Films, 108 (1983) 157-163.
- 17 Pinedo CE, Monteiro WA. Surface hardening by plasma nitriding on high chromium alloy steel, Journal of Materials Science Letters, 20 (2001) 147-149.
- 18 Maliska AM. Influência de elementos de liga e do oxigênio no processo de nitretação por plasma em aços sinterizados. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, Thesis in portuguese, 1995.
- 19 ASM, ASM Handbook: Heat treating. Vol. 4, ASM International, Materials Park, 1991.
- 20 Klein AN, Cardoso RP, Pavanati HC, Binder C, Maliska AM, Hammes G, Fusao D, Seeber A, Brunatto SF, Muzart JLR. DC plasma technology applied to powder metallurgy: An overview, Plasma Science and Technology, 15 (2013) 70-81.
- 21 Jeong BY, Kim MH. Effects of pulse frequency and temperature on the nitride layer and surface characteristics of plasma nitrided stainless steel, Surface and Coatings Technology, 137 (2001) 249-254.
- 22 Karakan M, Alsaran A, Çelik A. Effects of various gas mixtures on plasma nitriding behavior of AISI 5140 steel, Materials Characterization, 49 (2002) 241-246.
- 23 Masuko M, Kudo T, Suzuki A. Effect of surface roughening of substrate steel on the improvement of delamination strength and tribological behavior of hydrogenated amorphous carbon coating under lubricated conditions, Tribology Letters, 51 (2013) 181-190.
- 24 Singh GP, Alphonsa J, Barhai PK, Rayjada PA, Raole PM, Mukherjee S. Effect of surface roughness on the properties of the layer formed on AISI 304 stainless steel after plasma nitriding, Surface and Coatings Technology, 200 (2006) 5807-5811.
- 25 Ikeyama M, Nakao S, Miyagawa Y, Miyagawa S. Effects of Si content in DLC films on their friction and wear properties, Surface and Coatings Technology, 191 (2005) 38-42.
- 26 Nakanishi K, Mori H, Tachikawa H, Itou K, Fujioka M, Funaki Y. Investigation of DLC-Si coatings in large-scale production using DC-PACVD equipment, Surface and Coatings Technology, 200 (2006) 4277-4281.
- 27 De Mello JDB, Binder R. A methodology to determine surface durability in multifunctional coatings applied to soft substrates, Tribology International, 39 (2006) 769-773.
- 28 Mason RS, Pichilingi M. Sputtering in a glow discharge ion source-pressure dependence: theory and experiment, Journal of Physics D: Applied Physics, 27 (1994) 2363.