

ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE SISTEMAS $Cr_{1-x}Al_xN$ E TiC_xN_{1-x} DÚPLEX E NÃO DÚPLEX¹

Hugo Filipe Parreiras Gonçalves²

Rafael Drumond Mancosu³

Janaina Kizzi de Moraes Silva⁴

Sandra Goulart Santos⁵

Cristina Godoy⁶

Resumo

Amostras de aço ABNT 1045 nitretados e não nitretados foram recobertas com filmes $Cr_{1-x}Al_xN$ e TiC_xN_{1-x} formando quatro sistemas de estudo para serem avaliados em desgaste por deslizamento. Os sistemas foram caracterizados por Difractometria de raios-X, onde as fases dos recobrimentos e substratos foram identificadas. Os sistemas passaram por testes de Adesão Rockwell-C, e os conjugados monocamada para ambos recobrimentos apresentaram melhor adesão segundo o padrão comparativo. As espessuras dos filmes foram estimadas por microscopia eletrônica de varredura. Os sistemas foram submetidos a testes de desgaste por deslizamento no equipamento tribometro esfera-sobre-disco em forças de 2N e 5N. Para a força de 2N, não foi possível diferenciar os sistemas. Para a força de 5N, percebeu-se que o recobrimento $Cr_{1-x}Al_xN$, mais duro, apresentou melhor resposta ao desgaste do que o TiC_xN_{1-x} , mais macio, e que o sistema TiC_xN_{1-x} com substrato nitretado apresentou melhor desempenho em relação ao TiC_xN_{1-x} não nitretado para esta mesma força. As imagens de MEV possibilitaram ver que o TiC_xN_{1-x} não nitretado expôs o substrato na trilha formada pelos testes de desgaste, para a carga de 5N enquanto o sistema TiC_xN_{1-x} nitretado não expôs o substrato, confirmando a eficiência da nitretação.

Palavras-chave: Desgaste por deslizamento; Nitretação a plasma; Recobrimentos PVD.

COMPARATIVE STUDY OF WEAR RESITANCE OF $Cr_{1-x}Al_xN$ AND TiC_xN_{1-x} DUPLEX AND NON-DUPLEX SYSTEMS

Abstract

Samples of AISI 1045 steel, nitrided and non-nitrided, were coated with $Cr_{1-x}Al_xN$ and TiC_xN_{1-x} making four systems to sliding wear resistance studies. All systems were characterized by X-ray Diffraction aiming to identify substrate and coating phases. Rockwell C Adhesion Test was also carried out; according to the reference the non-duplex systems presented better adhesion than duplex systems. Coatings thicknesses were evaluated by SEM. Sliding wear tests were carried out into a ball-on disk tribometer using 2N and 5N forces. For 2N force, it was not possible to differentiate the duplex and non-duplex systems wear resistance. For 5N force, $Cr_{1-x}Al_xN$ coating presented better performance to wear than TiC_xN_{1-x} film, and TiC_xN_{1-x} duplex system presented better performance to wear than TiC_xN_{1-x} non-duplex system. SEM images for TiC_xN_{1-x} non-duplex system indicate the exposition of the steel substrate after wear test at 5N, the same do not occurred with TiC_xN_{1-x} duplex system, indicating that plasma nitriding improve the wear resistance of the steel.

Key words: Sliding wear; Plasma nitriding; PVD coatings.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Bolsista de Iniciação Científica FAPEMIG - Laboratório Tribologia DEMET/UFMG

³ Bolsista de Pós-doutorado FAPEMIG - Laboratório Tribologia DEMET/UFMG

⁴ Bolsista de doutorado CAPES - Laboratório Tribologia DEMET/UFMG

⁵ Bolsista de doutorado CNPq - Laboratório Tribologia DEMET/UFMG

⁶ Professora Adjunta DEMET/UFMG

INTRODUÇÃO

Desde a introdução de revestimentos cerâmicos duros no começo dos anos 80, sua aplicação industrial cresceu rapidamente. Revestimentos cerâmicos duros preparados por Deposição Física de Vapor Assistida por Plasma (PAPVD) são usados amplamente para reduzir a fricção e melhorar a resistência ao desgaste das superfícies. O revestimento de nitreto de titânio (TiN) vem sendo amplamente investigado,^[1,2] assim com o nitreto de cromo (CrN). Atualmente, pesquisas mostram que a adição de um terceiro elemento a estes recobrimentos resulta em melhoria nas suas propriedades. Como exemplo, o resultado principal da adição de carbono ao filme (TiN) formando carbo-nitreto de titânio (TiC_xN_{1-x}) é o aumento na dureza do revestimento.^[3] E a incorporação de átomos de alumínio a filmes de (Cr-N), processados por PAPVD, produzindo o filme $Cr_{1-x}Al_xN$, resulta em alta resistência à oxidação e aumentos significativos da dureza a quente, segundo o catálogo de recobrimentos da BALZERS Brasil. O Objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de conjugados de aço ABNT 1045 recobertos com filmes $Cr_{1-x}Al_xN$ e TiC_xN_{1-x} em sistemas nitretados e não nitretados para estudar e comparar suas propriedades tribológicas em diferentes situações de desgaste.

MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de aço ABNT 1045 foram recobertas com filmes $Cr_{1-x}Al_xN$ e TiC_xN_{1-x} , nos seguintes sistemas: (i) Aço ABNT 1045 recoberto com filme $Cr_{1-x}Al_xN$ ($Cr_{1-x}Al_xN$ mono), (ii) Aço ABNT 1045 nitretado com filme $Cr_{1-x}Al_xN$ ($Cr_{1-x}Al_xN$ duplex), (iii) Aço ABNT 1045 recoberto com filme TiC_xN_{1-x} (TiC_xN_{1-x} mono) e (iv) Aço ABNT 1045 nitretado recoberto com filme TiC_xN_{1-x} (TiC_xN_{1-x} duplex) por PAPVD, na TECVAC, Inglaterra. Foram utilizadas as condições desenvolvidas por BATISTA *et al.*^[4] correspondendo à faixa de temperatura de 400-450°C para a deposição do filme $Cr_{1-x}Al_xN$ e de 450-500 °C para o filme TiC_xN_{1-x} e a nitretação, ambos em um intervalo de tempo de 1 a 2 horas.

Os sistemas foram caracterizados por Difração de Raios-X (DRX), Teste de Adesão Rockwell-C, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e por ensaios de ultramicro dureza instrumentada. A DRX foi utilizada para caracterização das fases cristalinas presentes nos recobrimentos dos sistemas. Foi utilizado o difratômetro PHILIPS, modelo PW 1710 com radiação de $Cu-K_\alpha$ ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), voltagem do tubo=40 KV, corrente=20 mA, faixa de varredura (2θ) de 10° a 110°, a 0,02°/s e cristal monocromador de grafita, do Laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. O Teste de Adesão Rockwell-C foi realizado com o objetivo de avaliar qualitativamente, a adesão dos filmes aos substratos. Foi utilizado o Durômetro Zwick δ Co.KG- Einsinger bei ULM (modelo Z302), com indentador cônico (padrão Rockwell C), do Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. A avaliação qualitativa da adesão de um filme tem sido realizada pela técnica descrita por Heinke *et al.*^[5] Neste método, após aplicação de uma força de 1470N, as micro trincas geradas no contorno da impressão da penetração são visualizadas por microscopia ótica em um aumento de 100X e a adesão do filme ao substrato é classificada de acordo com um

estudo comparativo dessas trincas segundo os padrões estabelecidos. Utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura da JEOL JSM 6360LV, do Laboratório de Microscopia Eletrônica e de Varredura do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG para: (i) obter imagens dos sistemas em cortes transversais visando estimar a espessura dos filmes, (ii) geração de imagens topográficas por elétrons secundários com o objetivo de mostrar a morfologia da superfície após os testes de desgaste e (iii) geração de imagens de raios-X de Fe para análise das trilhas formadas devido o desgaste. Foram realizados testes no Ultramicrodurômetro modelo DUH-W201S, em sistema de dureza HIT (Dureza Por Penetração Instrumentada) com dois objetivos: (i) medir a espessura das camadas nitretadas dos conjugados TiC_xN_{1-x} e $Cr_{1-x}Al_xN$ duplex e (ii) as durezas de topo dos conjugados monocamadas. Para se medir a espessura da camada nitretada, uma força de 100mN foi aplicada ao longo da seção transversal num espaçamento de 30 μ m, a partir da interface filme/substrato. A dureza de topo foi obtida aplicando-se as cargas de 30, 50, 100, 1000 e 1900mN no topo das amostras. Cada valor de dureza é a média de cinco medidas.

Após a caracterização, os sistemas foram submetidos a testes de desgaste no equipamento Tribômetro Esfera-sobre-disco Microphotonics, modelo Standard, do Laboratório de Recobrimentos Tribológicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. Foi utilizada uma esfera de metal duro (WCCo), com raio=4mm. Foi utilizada a velocidade de escorregamento de 500 rpm com um percurso total de 30000 rotações, e raio de rotação de 3mm, totalizando um percurso de 565,2m. Todos os testes foram realizados ao ar. Cada sistema foi sujeito a diferentes condições de carregamento, a saber: 2N e 5N, simulando desgaste brando e severo. Após o desgaste, uma trilha foi criada na superfície de contato com a esfera. Os testes de desgaste serão analisados também pelos gráficos dados pelo software do tribômetro, gráficos de profundidade de desgaste versus tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tantos as fases dos recobrimentos como as fases do substrato foram identificadas pela técnica de DRX. Para os sistemas $Cr_{1-x}Al_xN$ monocamada e dúplex, identificou-se a fase $Cr_{1-x}Al_xN$ -CFC para o recobrimento. No substrato do sistema $Cr_{1-x}Al_xN$ monocamada foi identificada uma única fase CCC-Fe. O sistema $Cr_{1-x}Al_xN$ dúplex apresentou três fases para o substrato: ϵ - Fe_2N_{1-z} e γ - Fe_4N_{1-z} , e CCC-Fe, sendo os nitretos provenientes da nitretação. Estes resultados são mostrados na Figura 1. De acordo com a literatura, a estrutura cristalina dos filmes $Cr_{1-x}Al_xN$ é basicamente a estrutura cúbica CFC, protótipo B1-NaCl. Para percentuais de Al variando entre $x=0$ e $x= 0,6$. Entre $x=0,7$ e $x=0,8$ ocorre mudança da estrutura cristalina de B1-NaCl para uma estrutura cristalina denominada B4-Wurtzita, protótipo ZnS, que é uma estrutura hexagonal com os sítios octaédricos ocupados, no caso com a composição química correspondente a $Cr_{1-x}Al_xN$ - hexagonal.^[6,7] Como nas análises do DRX dos filmes dos sistemas $Cr_{1-x}Al_xN$ monocamada e dúplex estudados neste trabalho indicam a presença de uma única fase CFC, tem-se que provavelmente o teor de Al dos recobrimentos encontra-se entre $x=0$ e $x=0,6$.

Os filmes dos sistemas TiC_xN_{1-x} monocamada e dúplex apresentaram uma única fase de estrutura TiC_xN_{1-x} -CFC. O substrato do sistema TiC_xN_{1-x} monocamada é

monofásico, sendo esta fase CCC-Fe. No substrato do sistema TiC_xN_{1-x} dúplex, assim como no substrato do sistema $Cr_{1-x}Al_xN$ dúplex, identificaram-se as fases $\varepsilon-Fe_2N_{1-z}$ e $\gamma-Fe_4N_{1-z}$, devido a nitretação, além do CCC-Fe. Estes resultados são vistos na Figura 2. Conclui-se que os sistemas monocamadas estudados são estruturalmente similares assim como os sistemas dúplex (Tabela 1).

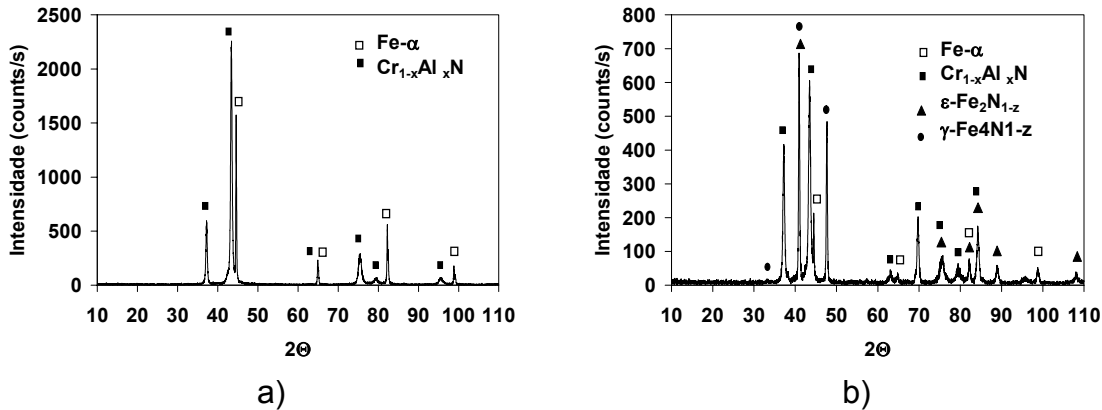


Figura 1: Difratoograma dos conjugados de $Cr_{1-x}Al_xN$: (a) mono e (b) dúplex.

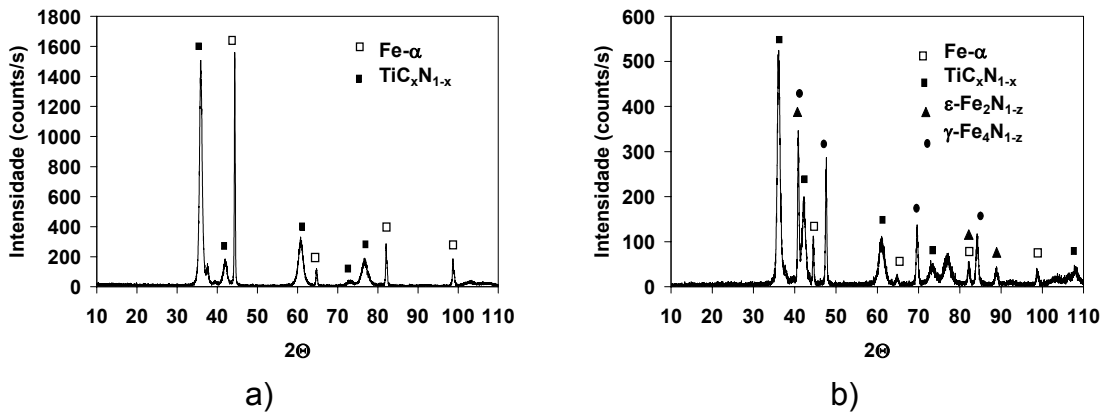


Figura 2: Difratoograma dos conjugados de TiC_xN_{1-x} : (a) mono e (b) dúplex.

Tabela 2: Fases encontradas nos sistemas estudados.

Sistema	Fases
$Cr_{1-x}Al_xN$ mono	CCC-Fe, CFC- $Cr_{1-x}Al_xN$
$Cr_{1-x}Al_xN$ dúplex	CCC- Fe, $\varepsilon-Fe_2N_{1-z}$ e $\gamma- Fe_4N_{1-z}$, CFC- $Cr_{1-x}Al_xN$
TiC_xN_{1-x} mono	CCC-Fe, CFC- TiC_xN_{1-x}
TiC_xN_{1-x} dúplex	CCC-Fe- α , $\varepsilon-Fe_2N_{1-z}$ e $\gamma- Fe_4N_{1-z}$, CFC- TiC_xN_{1-x}

Os sistemas monocamada $Cr_{1-x}Al_xN$ e TiC_xN_{1-x} apresentaram boa adesão de acordo com Heinke^[5] (Figura 3a, 3c). Já os sistemas $Cr_{1-x}Al_xN$ e TiC_xN_{1-x} dúplex, atingiram os padrões de trincas e, segundo Heinke,^[5] indicaram baixa adesão destes filmes ao substrato (Figura 3b, 3d). Em ambos os recobrimentos, os sistemas monocamada apresentaram melhor adesão que os sistemas dúplex (Figura 3), pois os sistemas monocamada apresentaram somente trincas radiais e circulares enquanto os sistemas dúplex mostraram delaminações. Pode se dizer que o conjugado $Cr_{1-x}Al_xN$

dúplex apresenta uma adesão ligeiramente melhor que o conjugado TiC_xN_{1-x} , dúplex, pois o primeiro apresentou menos delaminações. Quanto aos conjugados TiC_xN_{1-x} mono e $Cr_{1-x}Al_xN$ mono não se pode fazer a mesma afirmação porque ambos apresentaram boa adesão segundo o padrão.

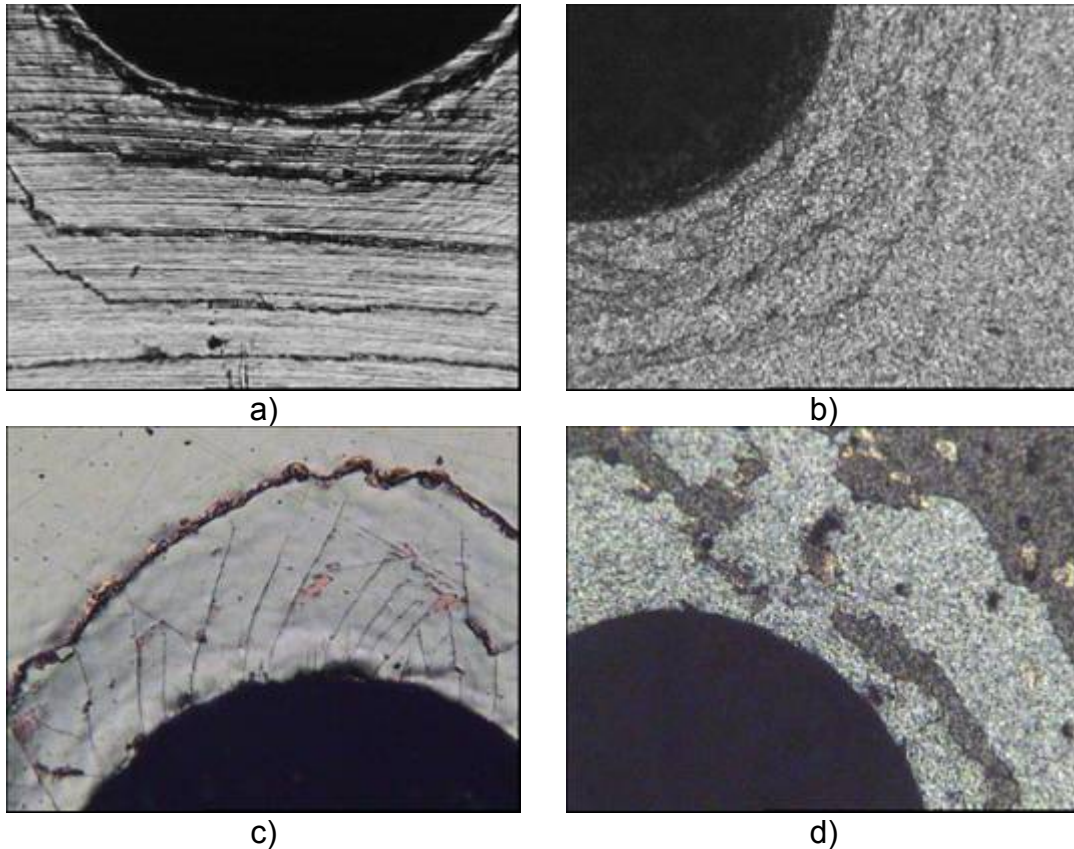


Figura 3: Imagens de MO dos testes de Adesão Rockwell-C para os sistemas: (a) $Cr_{1-x}Al_xN$ mono, (b) $Cr_{1-x}Al_xN$ dúplex, (c) TiC_xN_{1-x} mono e (d) TiC_xN_{1-x} dúplex. Força de 1470N e aumento de 100X.

Através do MEV foi possível medir as espessuras dos filmes. A Figura 4 demonstra um exemplo de como foram medidas as espessuras dos filmes nos sistemas utilizados através das imagens por MEV. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Para se estimar as espessuras das camadas nitretadas dos conjugados dúplex $Cr_{1-x}Al_xN$ e TiC_xN_{1-x} , os valores de dureza obtidos pelo software do ultra-microdurômetro foram plotados em um gráfico dureza versus a profundidade (Figura 5). A nitretação endurece o substrato, e a dureza decresce desde a interface substrato/recobrimento até ficar constante. É neste ponto, onde a dureza fica praticamente linear, que se considera o fim da nitretação, ou seja, a espessura da camada nitretada. Para o conjugado TiC_xN_{1-x} dúplex a espessura da camada nitretada estimada foi de aproximadamente $140\mu m$ e para o conjugado $Cr_{1-x}Al_xN$ dúplex uma espessura em torno de $200\mu m$ foi estimada (Figura 5).

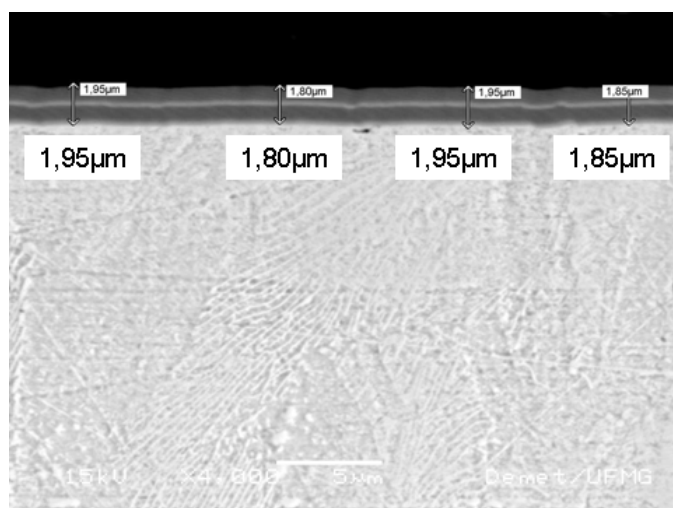


Figura 4: Medida da espessura do recobrimento do sistema $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ mono por MEV em corte transversal.

Tabela 2: Medida da espessura do recobrimento do sistema $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ mono por MEV em corte transversal.

Sistema	Espessura (μm)	
	Média	Desvio Padrão
$\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ mono	1,85	0,075
$\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ dúplex	2,00	0,085
$\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ mono	2,50	0,096
$\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ dúplex	3,00	0,095

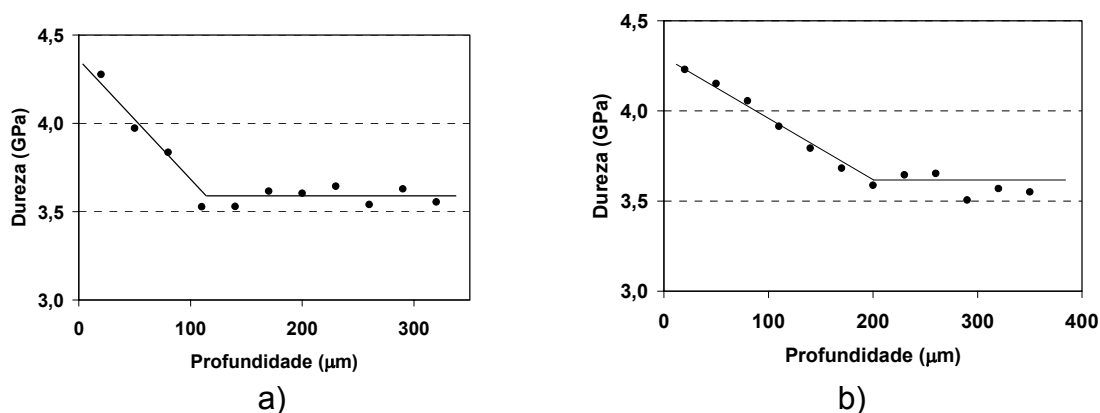


Figura 5: Variação da dureza ao longo da profundidade: a) $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ dúplex, b) $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ dúplex

Na medição de dureza por topo, em todas as cargas, o conjugado $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ mono apresentou maior dureza de topo em relação ao conjugado $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ mono (Figura 6). Pode-se notar que, com o aumento da carga há uma diminuição do valor da dureza, Isto é explicado pelo fato de que o aumento da força faz com que a penetração seja mais profunda e a dureza do substrato influencie mais neste valor. Isso é aceitável já que se tem um substrato macio.

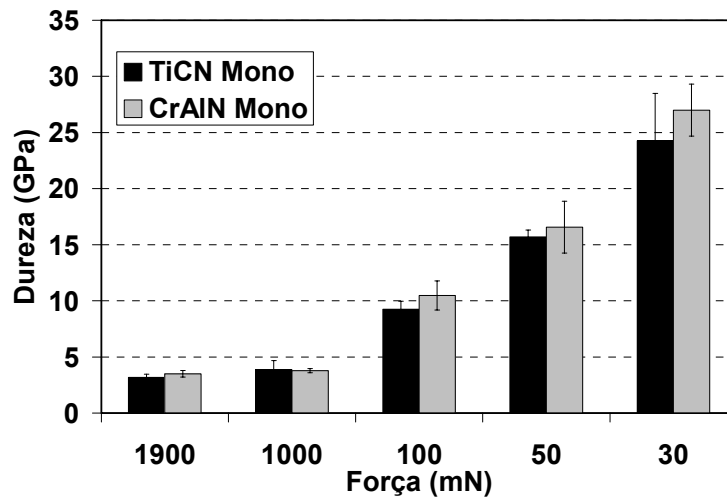


Figura 6: Dureza de topo dos sistemas $Cr_{1-x}Al_xN$ mono e TiC_xN_{1-x} mono

Os gráficos de profundidade versus tempo de desgaste, produzidos no software do tribômetro esfera-sobre-disco, para ambas as forças, estão nas Figuras 7 e 8. Percebe-se, para todos os conjugados, uma queda na curva para as duas condições, até o tempo de aproximadamente 1000 segundos. Este tempo foi interpretado como sendo relativo ao tempo de “incubação” (*running in*), que corresponde ao período inicial de desgaste, onde não se vê ainda uma correlação linear crescente entre volume desgastado e tempo de desgaste.^[8] Após o tempo de incubação, a profundidade começa a aumentar, evidenciando a penetração da esfera de metal duro produzindo desgaste, segundo a lei de Archard.^[8]

Para a força de 2N não foi possível diferenciar o desempenho de um recobrimento em um sistema nitretado em relação a um sistema não nitretado, nem diferenciar um recobrimento com o outro em sistemas nitretado e não nitretado. Supõe-se que para esse carregamento, a influência do substrato foi muito pequena, já que a força não propiciou um afundamento nas amostras que atingissem o substrato. Se diferenças fossem observadas nesta taxa de desgaste neste nível de força aplicada, seriam devido à diferença das durezas observadas nos recobrimentos, medidas em cargas muito pequenas.

Para a força de 5N também não foi possível determinar diferenças, para o mesmo recobrimento, em sistema nitretado ou não nitretado. Mas têm-se diferenças claras nas respostas ao desgaste entre os sistemas de $Cr_{1-x}Al_xN$ e TiC_xN_{1-x} , com e sem nitretação, sendo que, os sistemas deste último filme tiveram maior inclinação nas curvas de taxa de desgaste (profundidade/tempo), indicando maior taxa de desgaste (Figura 8). Por estes resultados nota-se que o recobrimento mais duro apresentou maior resistência ao desgaste.

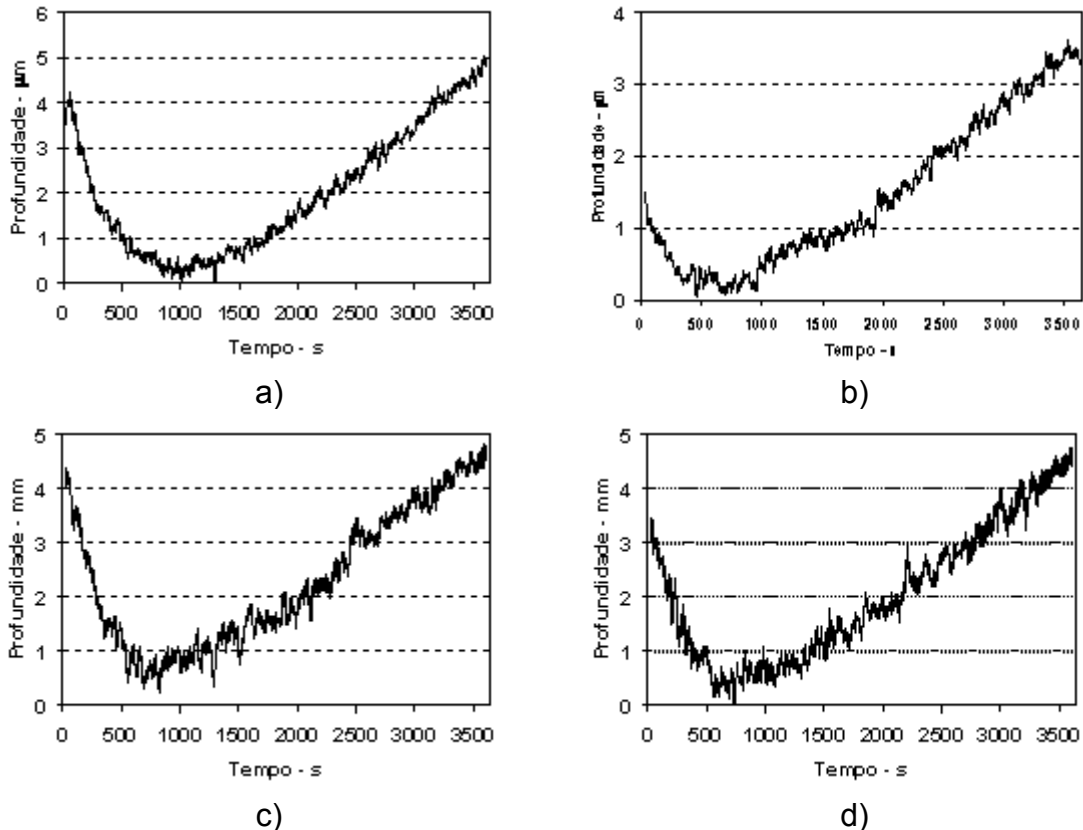


Figura 7: Gráficos da profundidade para força de 2N para os sistemas: (a) $Cr_{1-x}Al_xN$ mono, (b) $Cr_{1-x}Al_xN$ duplex, (c) TiC_xN_{1-x} mono e (d) TiC_xN_{1-x} duplex.

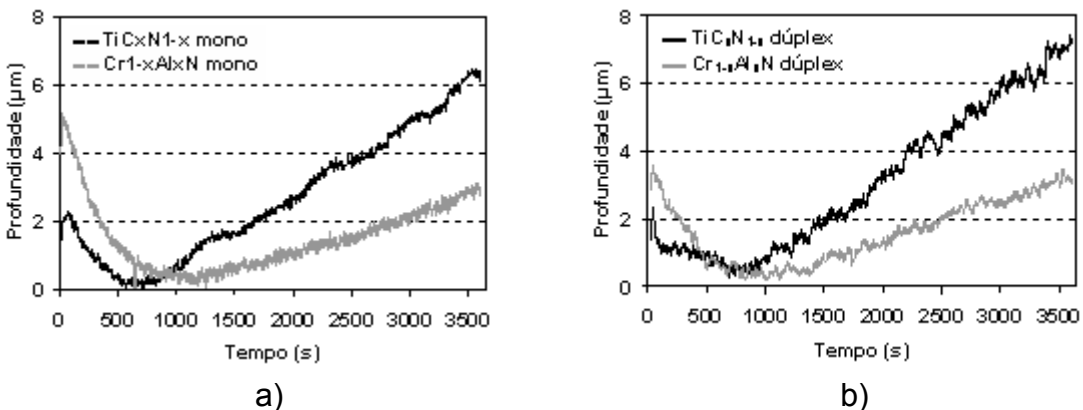


Figura 8: Gráficos da profundidade para força de 5N para os sistemas $Cr_{1-x}Al_xN$ e TiC_xN_{1-x} : a) sistemas mono, b) sistemas duplex.

As análises dos traços por MEV auxiliaram na diferenciação das respostas frente ao desgaste. Esta análise é demonstrada na Figura 9, para a força de 5N, onde a coluna (a) corresponde a imagem com um aumento de 12X das trilhas, a coluna (b) a uma imagem com aumento de 100X na trilha e (c) imagem de raios-X da trilha com aumento de 100X para elemento Fe, onde as regiões claras indicam presença do elemento. Para a força de 2N, seguindo o mesmo padrão da Figura 9, em nenhum dos sistemas, a trilha de desgaste atingiu o substrato. Para força de 5N, as trilhas dos

sistemas mono e dúplex de $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ não atingiram o substrato. Já no sistema $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ mono a trilha apresentou desgastes em algumas regiões e como se vê pelas imagens de raios-X, nota-se a presença de Fe. O sistema $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ dúplex, neste carregamento, não teve o substrato exposto nas trilhas de desgaste, mostrando que a nitretação melhorou a resposta do filme em relação ao desgaste. E também pode se concluir que a maior dureza do filme $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ melhorou a resposta do sistema ao desgaste, já que nos sistemas monocamada somente o conjugado de $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ atingiu o substrato para a força de 5N. Todos estes resultados são mostrados nas imagens da Figura 9.

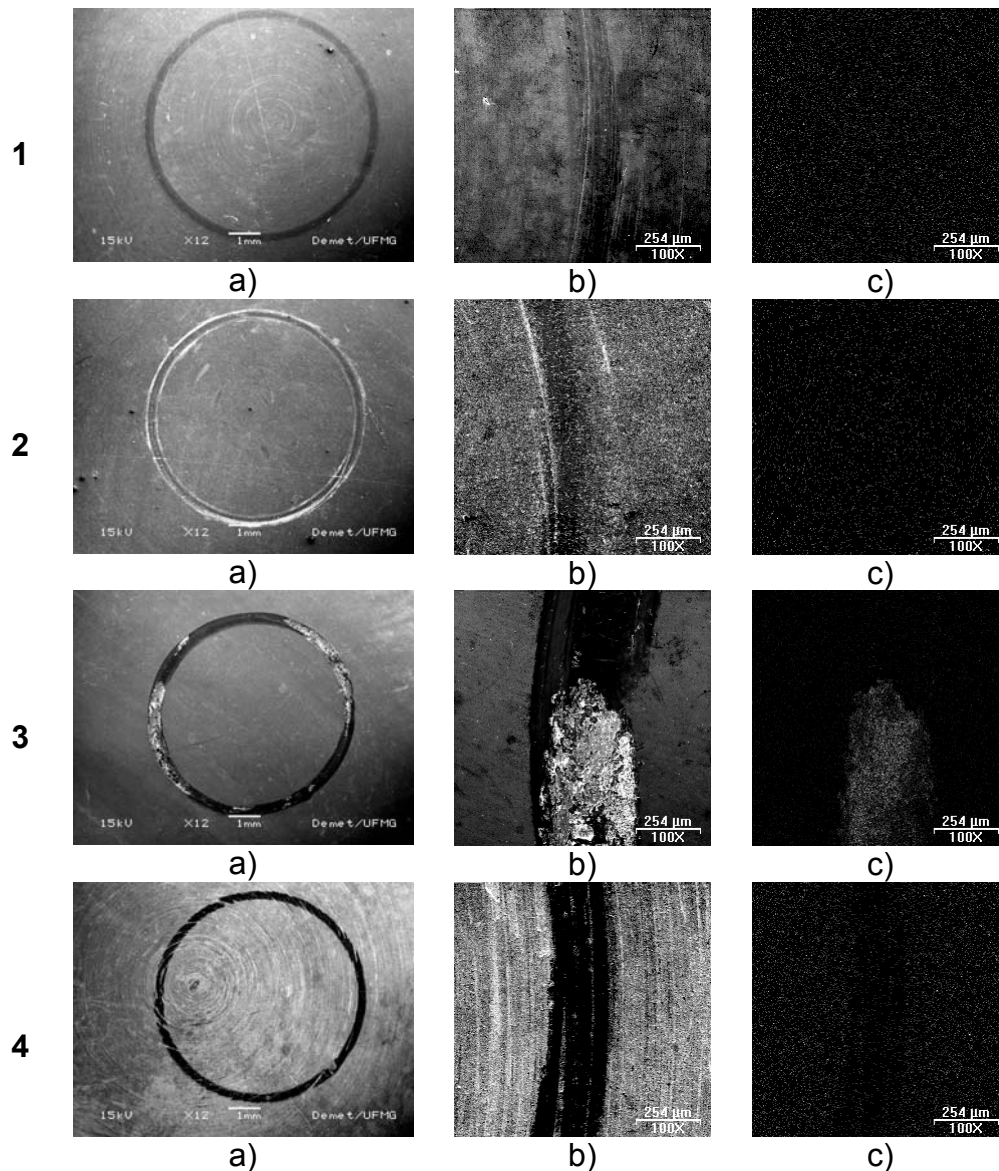


Figura 9: Imagens de MEV das trilhas formadas após desgaste por deslizamento para os sistemas: (1) $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ mono, (2) $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ dúplex, (3) $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ mono e (4) $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ dúplex.

CONCLUSÕES

- Para baixas forças utilizadas no tribômetro não é possível diferenciar sistemas de mesmo recobrimento nitretados e não nitretados, nem diferenciar o desempenho de um recobrimento para o outro. Sendo assim se torna necessário o uso de forças maiores para esta diferenciação.
- O recobrimento de maior dureza, $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$, apresentou melhor desempenho em relação ao desgaste, sendo mais resistente a perda de filme.
- A nitretação do conjugado $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ duplex aperfeiçoou o seu desempenho ao desgaste na força de 5N, em relação ao sistema $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ mono (que não possui nitretação), pois este último expôs o substrato na trilha de desgaste evidenciando arrancamento de filme.

REFERÊNCIAS

- 1 BATISTA, J.C.A. *Promising duplex coatings for tribological applications at elevated temperature*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2001a. 155p. (Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).Orientadora: G. C. GODOY.
- 2 PRENGEL, H. G., SANTHANAM, S. T., PENICH, R. M., JINDAL, P. C. and WENDT, K. H., Advanced PVD TiAlN coating on carbide and cermet cutting tools, *Surface and coatings Technology*, 94/95 (1997) 597 - 602.
- 3 BULL, S. J., BHAT, D. G., STAIA, M. H., Properties and performance of commercial TiCN coatings Part 1: coating architecture and hardness modeling, *Surface and Coatings Technology* 163 – 164 (2003) 499 – 506.
- 4 BATISTA, J. C. A.; GODOY, C.; MATTHEWS, A.; LEYLAND, A. Process developments towards producing well-adherent duplex PAPVD coatings, *Surface Engineering*, England, v. 19, n. 1, p. 37-44, 2003
- 5 HEINKE,W; LEYLAND,A; MATTHEWS,A; BERG,G; FRIEDRICH,C; BROSZEIT,E. *Evaluation of PVD Nitride Coatings, using Impact, Scratch and Rockwell-C Adhesion Tests*, *Thin Solid Films*. Germany, v.270, p.431-438, 1995
- 6 HASEGAWA, H.; KAWATE, M.; TETSUYA, S. Effects of Al Contents on Microstructures of $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ and $\text{Zr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ Films Synthesized by Cathodic Arc Method. *Surface and Coatings Technology*, 2004.
- 7 MAKINO, Y.; NOGI, K. Synthesis of Pseudo binary Cr-Al-N Films with B1 Structure by rf-Assisted Magnetron Sputtering Method. *Surface and Coatings Technology*, v.98, p.1008-1012, 1998.
- 8 RABINOWICZ, E. *Friction of Materials Second Edition*; John Wiley & Sons, USA, p.315.