

AValiação DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE ALUMÍNIO DE CONJUGADOS $Ti_{1-x}Al_xN$ /AISI H13 NO DESGASTE, ATRAVÉS DO VOLUME DE DESGASTE OBTIDO POR PERFILOMETRIA ¹

Janaína Kizzi Morais²

Cristina Godoy³

Rafael Drumond Mancosu⁴

Resumo

O desempenho de ferramentas para trabalho a quente tem sido otimizado através de filmes depositados por PVD, como o $Ti_{1-x}Al_xN$, que é aplicado contra o desgaste da ferramenta. O teor de alumínio do filme interfere em sua estrutura cristalina e dureza, influenciando a resistência ao desgaste. Este trabalho pretende avaliar a influência do teor de alumínio presente em filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ depositados em aço H13, no desgaste por deslizamento. Conjugados $Ti_{1-x}Al_xN$ com dois teores de Al (BA,baixo Al; AA,alto Al) foram caracterizados por DRX, GDOES e adesão RockwellC, para diferenciar os filmes quanto à estrutura cristalina e composição. A penetração instrumentada visou diferenciar as durezas dos conjugados, com forças entre 32mN (maior influência do filme) e 1900mN. Testes de desgaste no tribômetro esfera sobre disco foram feitos a 7N, contra Si_3N_4 6 mm. A taxa de desgaste (volume/distância) foi calculada a partir do volume, estimado por perfilometria 3D. O MEV foi usado na obtenção de imagens de composição no interior e no entorno dos traços de desgaste, verificando a presença dos elementos Al (do filme) e Fe (do substrato). O filme BA(Ti-Al-N) apresentou-se monofásico com estrutura $Ti_{1-x}Al_xN$ -CFC. O filme AA apresentou as fases $Ti_{1-x}Al_xN$ -CFC e hexagonal, havendo diferença estrutural dos filmes. A análise de GDOES corrobora a diferença dos filmes quanto à composição química. O filme AA(Ti-Al-N) apresentou adesão menor e nanodureza superior à do filme BA (F=32mN). Ressalta-se que a espessura deste filme foi ligeiramente inferior. Comparando os sistemas estudados, o conjugado AA apresentou a menor taxa de desgaste, sugerindo a importância da estrutura com alta dureza de filmes finos na resistência ao desgaste e evidenciando que a dureza e a razão H/E foram mais importantes do que a espessura e adesão dos filmes no desempenho em desgaste. A deposição de ambos os filmes melhorou o desempenho do aço H13 em desgaste.

Palavras-chave: Perfilometria; Filmes $Ti_{1-x}Al_xN$; Desgaste.

EVALUATION OF THE ALUMINUM CONTENT OF THE FILM ON THE WEAR OF THE $Ti_{1-x}Al_xN$ /AISI H13 MADE OF THE WEAR VOLUME ESTIMATED BY PROFILOMETRY

Abstract

The performance of the hot tools for work has been optimized through films deposited by PVD, such as $Ti_{1-x}Al_xN$ that is applied against the wear of the tool. The content of aluminum of the film movie affects its crystalline structure and hardness, influencing the wear resistance. This paper seeks to evaluate the influence of the content of aluminum present in films $Ti_{1-x}Al_xN$ deposited in steel H13, in the sliding wear. Coatings $Ti_{1-x}Al_xN$ on AISI H13 steel with two levels of Al (BA, down Al; AA, high Al) were characterized by DRX, GDOES and RockwellC adhesion, to differentiate the films on the crystalline structure and composition. Penetration instrumented aimed differentiate hardness of conjugated with forces between 32mN (greater influence of the film) and 1900mN. Wear tests in ball on the disk tribometer were made 7N against Si_3N_4 6 mm. The wear rate (volume / distance) was calculated from the volume, estimated by profilometry 3D. The SEM was used in obtaining images of composition within and around the traces of wear, noting the presence of the elements Al (of the film) and Fe (of the substrate). The film BA (Ti-Al-N) showed up with monophasic structure $Ti_{1-x}Al_xN$ -CFC. The film showed the AA phases $Ti_{1-x}Al_xN$ -CFC and hexagonal, with structural difference of films. The analysis of GDOES corroborates the difference of films about the chemical composition. The film AA (Ti-Al-N) presented adhesion smaller and nanodureza superior to the film BA (F = 32mN). It is emphasized that the thickness of this film was slightly lower. Comparing the systems studied, the AA showed the lowest wear rate, suggesting the importance of the structure with high hardness of thin films in the resistance to wear and showing that the hardness and the reason H / E were more important than the thickness and adhesion of the films in the performance wear. The deposition of both films improved performance of the H13 in the wear.

Key words: Profilometry, $Ti_{1-x}Al_xN$ Films, wear.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG. jkizzi@ig.com.br

³ Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG. gcgodoy@demet.ufmg.br;

⁴ Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG rafadrumond@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

O controle do desgaste ocorre geralmente por avaliação da textura da superfície após o desgaste e por avaliações das taxas de desgaste. Duas definições de taxas de desgaste são em geral utilizadas na tentativa de avaliar quantitativamente o desgaste: uma primeira, a taxa de desgaste Q , que é obtida a partir da determinação do volume de material removido por desgaste por unidade de distância de escorregamento e é dada por mm^3/m ;[1] e uma segunda definição, a taxa de desgaste k , dada em unidades de $\text{mm}^3 (\text{Nm})^{-1}$, que representa o volume desgastado por unidade de distância (m), por unidade de carga normal (N). Ambas as taxas são parâmetros que dependem da determinação do volume desgastado.

A maioria dos ensaios experimentais utiliza a determinação de variação de massa por unidade de tempo para avaliar a taxa de desgaste, considerando a densidade do material e uma velocidade constante. A partir da densidade do material, pode-se estimar o volume desgastado. A comparação de resposta de diferentes materiais em relação ao desgaste, neste tipo de experimento, deve considerar as densidades diferenciadas de cada material, senão a comparação ocorrerá de uma maneira equivocada. Considerando materiais conjugados (recobrimento mais substrato), a avaliação deste volume desgastado através do uso da densidade torna-se imprecisa e complexa, devido à combinação de materiais com densidades diferentes.

Uma das propostas deste trabalho consiste na avaliação deste volume desgastado, através da combinação de resultados produzidos por dois equipamentos: o perfilômetro, que possibilita análises tridimensionais com medições de volume de uma certa região delimitada e o tribômetro Pino sob Disco, que produz desgaste com controle de carga e velocidade. Esta abordagem tridimensional do fenômeno desgaste, através do monitoramento das variações topográficas e do estabelecimento de uma metodologia para estimar o volume de desgaste de sistemas recobertos.

Recobrimentos $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ podem apresentar-se monofásicos e/ou bifásicos; austeníticos e/ou hexagonais em função do teor de alumínio do filme. Devido ao fato de apresentarem estruturas diferentes, terão propriedades diferentes, como propriedades mecânicas, térmicas, de elasticidade e de tenacidade, o que afetará o desempenho em desgaste. Assim, também será avaliada a influência do teor de alumínio destes filmes no desgaste.[2,3]

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram utilizados como substratos, discos de aço H13 (cortados a partir de uma barra de 1,5 m de comprimento e $\frac{3}{4}$ pol de diâmetro). Foram produzidos conjugados Alto Alumínio (AA) $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ /discos de AISI H13 (corrida-padrão), conjugados Baixo Alumínio (BA) $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ /discos de AISI H13 (corrida-dedicada).

A produção dos conjugados foi realizada na TECVAC, Inglaterra. A deposição dos filmes foi feita pelo processo de Evaporação por Feixe de Elétrons Assistido a Plasma (EBPAPVD), usando o sistema TECVAC IP35L, em uma faixa de temperatura de 400°C-450°C.

Foram realizados testes de DRX para a caracterização dos conjugados estudados em relação às fases cristalinas presentes. Esta técnica também apresentou a finalidade de diferenciar os filmes em relação à estrutura cristalina. Foi utilizado o difratômetro PHILIPS, modelo PW 1710, a partir da radiação de $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1,54056$

Å, voltagem do tubo= 40 KV, corrente= 20 mA) e cristal monocromador de grafita . A varredura a ser utilizada foi de 0,02°/ s, no intervalo de 2θ entre 10,01° e 109,99°.

Foram realizados testes comparativos de adesão Rockwell C para comparar e avaliar qualitativamente, a adesão dos filmes BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ em cada substrato estudado, sendo usadas cargas acumulativas de 62,5 kgf, 100 Kgf e 150 kgf, sendo esta última a carga utilizada na obtenção dos padrões de trinca morfologias, descritos pela Norma.^[4] Foram obtidas imagens de microscopia eletrônica das indentações do teste de adesão após a carga de 150 Kgf (aumento de 45X), contendo os padrões de trinca em torno de cada impressão.^[4]

Foi utilizada a técnica de GDOES nos sistemas conjugados para avaliar a variação da composição dos elementos Al (elemento do filme) e Fe (elemento do substrato) ao longo da profundidade do conjugado, possibilitando estimar as espessuras dos filmes estudados, além de diferenciar os filmes BA e AA de cada sistema estudado, em relação ao teor de alumínio. Foram obtidos gráficos da intensidade de alumínio e ferro (em contagem por segundo- cps) nos conjugados em função da profundidade (em nm).

Para estimar a dureza dos conjugados com maiores influências do substrato e do filme, realizou-se testes de penetração instrumentada no Ultra-micro-durômetro SHIMADZU DUH-W201S, usando o penetrador Berkovich. As forças aplicadas foram de 1900 mN, 1000 mN, 300, 100, 50 e 32 mN, sendo realizadas dez medições para cada força aplicada. Obteve-se o valor da dureza HIT(em GPa) média de cada força.^[5,6] Os valores de dureza foram estimados através do software SHIMADZU DUH Test Application Versão 2.14.

O ensaio de penetração instrumentada também possibilitou a mediação dos valores de módulo de elasticidade em todas as profundidades de penetração dos sistemas estudados, com o objetivo de avaliar a influência deste parâmetro no desgaste. Além disso, foi obtido o quociente entre os valores de todas as durezas e todos os módulos de elasticidade (H/E) medidos, para verificar qual sistema apresenta a maior dureza associada ao menor módulo de elasticidade (maior H/E) ou maior deformação elástica até a falha em desgaste, o que pode interferir no desempenho em desgaste.^[7]

Os ensaios de desgaste foram realizados no Tribômetro Esfera-sobre-Disco da Microphotonics, modelo Standard. O contra-corpo utilizado foi o Si_3N_4 6 mm; sendo usada a carga de 7N a 0,157 mm/s (500 rpm) e raio de percurso igual a 3 mm. Foram realizadas 30.000 revoluções, resultando em uma distância total de 565,8 m. Foram realizados três testes de desgaste para cada sistema conjugado estudado (1 teste e duas réplicas) e dois testes de desgaste (um teste e uma réplica) para o substrato estudado.

Utilizou-se a técnica de MEV após o desgaste para a obtenção de imagens de composição por raios-x dos traços de desgaste (aumento 100 X), possibilitando verificar a presença ou ausência do elemento do filme (Al) e do substrato (Fe), no interior e em torno do traço de desgaste dos conjugados estudados. Esta análise objetivou avaliar e comparar a intensidade do desgaste dos sistemas estudados.

A técnica de perfilometria tridimensional foi usada para medir o volume de desgaste dos conjugados contra a esfera de Si_3N_4 , possibilitando verificar a influência do teor de alumínio do filme na taxa de desgaste, que é proporcional ao volume, sendo o quociente entre o volume e a distância de deslizamento.^[1] Utilizou-se o perfilômetro T4000 da HOMMELWERKE, com apalpador móvel TK 300/90; a área de varredura de 81mm² (9 x 9 mm), sendo realizadas 200 medições com espaçamento de 45,5 μm. Utilizou-se uma velocidade de medição de 0,5 mm/s. Através do software

MountainsMap Expert 3.0, elaborou-se uma metodologia para estimar o volume de desgaste dos perfis obtidos. Escolheu-se o método do “Plano de Mínimos Quadrados” para estimar o volume de vales da área selecionada do perfil, sendo o volume dos vales correspondente ao volume do traço de desgaste. O cálculo do volume considera que cada ponto da superfície selecionada é considerado como uma coluna retangular, em que a base da superfície é definida de acordo com os eixos X e Y. Cada coluna possui um volume elementar entre duas altitudes. O volume dos picos e vales corresponde à soma dos volumes elementares calculados para cada coluna. No método do “Plano de Mínimos Quadrados” (Figura 1), o volume calculado é o incluído entre a base dos vales e o plano P ou o topo dos picos e o plano P, onde P é o Plano de Mínimos Quadrados calculado em todos os pontos externos à região selecionada. Este método é aplicado quando a área externa ao traço é suficientemente lisa para se considerada como o topo dos vales ou como a base dos picos, por extrapolação.^[8]

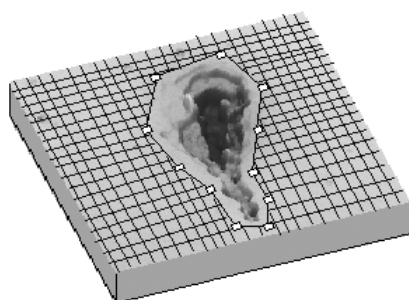


Figura 1- Ilustração do método do “Plano de Mínimos Quadrados” .^[8]

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de DRX (Tabela 1) do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ demonstra que o filme deste conjugado apresenta-se monofásico com fase $Ti_{1-x}Al_xN$ -CFC. O filme do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ é bifásico, com estruturas $Ti_{1-x}Al_xN$ -CFC e hexagonal, sugerindo propriedades diferentes destes filmes como a dureza, o que provavelmente acarretará diferença de desempenho em desgaste Sugere-se que os teores de alumínio dos filmes dos conjugados BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ sejam, respectivamente até em torno de 60% atômico de alumínio (teor relacionado à faixa monofásica) e em torno de 60 a 70% atômico (teor relacionado à faixa bifásica), fixando-se a quantidade de nitrogênio e considerando 50% da composição do filme.^[9-11] Ambos os conjugados apresentam as fases correspondentes ao substrato ($Fe-\alpha$ e Cr_7C_3).

Tabela 1. Fases cristalinas dos sistemas estudados.

Sistemas	Fases
AISI H13	$Fe-\alpha$ Cr_7C_3
BA $Ti_{1-x}Al_xN$	$Ti_{1-x}Al_xN$ -CFC $Fe-\alpha$ Cr_7C_3
AA $Ti_{1-x}Al_xN$	$Ti_{1-x}Al_xN$ - Hexagonal $Ti_{1-x}Al_xN$ -CFC $Fe-\alpha$ Cr_7C_3

As imagens de MEV após os testes de adesão dos conjugados BA e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ evidenciam a existência de trincas circulares, o que corrobora o fato de substratos mais macios apresentarem trincas circulares, evidenciando que a dureza do substrato influencia os padrões de trinca existentes ao redor da indentação.^[12] Na mesma carga aplicada (150 Kgf), observa-se a delaminação do filme AA $Ti_{1-x}Al_xN$, o que evidencia que este filme apresentou pior adesão ao aço H13 do que o filme BA, fato que deve ser considerado na comparação entre o desempenho destes dois conjugados em desgaste (Figura 2).

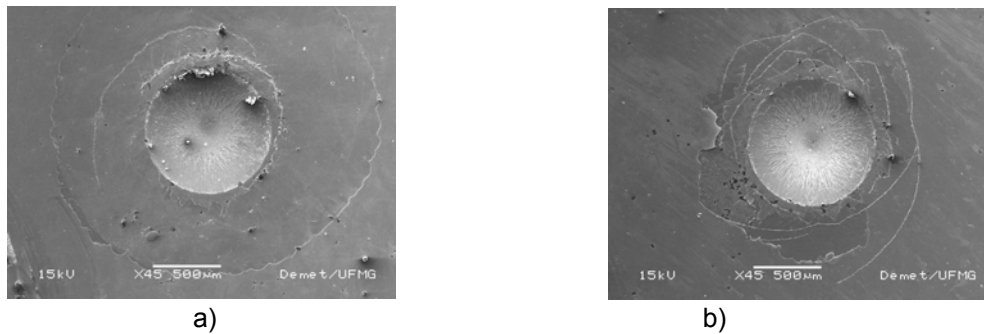


Figura 2 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$. 150Kgf (45X).

Através das imagens obtidas por GDOES (Figuras 3 e 4), observa-se que em ambas as curvas estudadas, o teor de alumínio inicia-se alto, diminuindo com o aumento da profundidade, demonstrando a transição dos filmes (que contêm Al) para o substrato (que não contêm Al). O contrário ocorre com o ferro, cuja quantidade aumenta com a profundidade (transição dos filmes para o substrato). O conjugado AA apresentou maior teor de alumínio em comparação ao BA, corroborando os resultados da análise de DRX, que através das estruturas cristalinas, sugeriram diferença de teor de alumínio entre os filmes. Na mesma escala de profundidade, o encontro entre os teores de Al e Fe (correspondente à transição do filme para o substrato), ocorreu em torno de 3800 nm (3,8 μm) para o conjugado BA e em torno de 3000 nm (3 μm) para o conjugado AA, sugerindo que o filme do conjugado BA apresenta maior espessura, o que deve ser avaliado na análise do desempenho destes conjugados em desgaste.

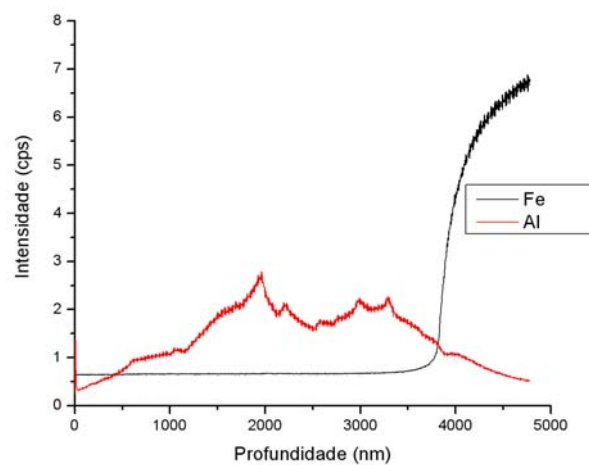


Figura 3- Variação da composição com a profundidade para o BA $Ti_{1-x}Al_xN$.

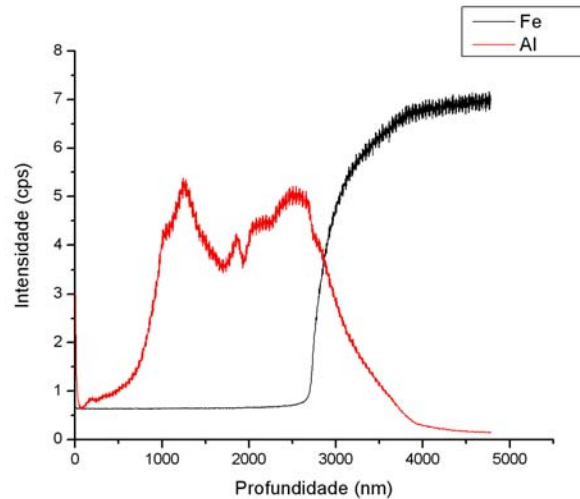


Figura 4- Variação da composição com a profundidade para o AA $Ti_{1-x}Al_xN$.

De acordo com a penetração instrumentada (Tabela II), observa-se que a deposição do filme AA $Ti_{1-x}Al_xN$ sobre o aço H13 aumentou a sua dureza superficial, considerando a maior carga aplicada (1.900 mN), com maior influência do substrato. Nas menores cargas (maior influência do filme), o filme do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ apresentou dureza superior ao filme do conjugado BA, fator que deve ser considerado na avaliação do desempenho em desgaste. Este resultado confirma estudos realizados,^[9-11] que indicaram que filmes monofásicos CFC (como o BA) apresentam dureza inferior a filmes bifásicos com estruturas CFC e hexagonal (como o AA), sugerindo diferentes desempenhos destes conjugados em desgaste. Observa-se em geral, uma ligeira redução do módulo de elasticidade com o aumento da força aplicada, pois há a transição do filme cerâmico (ligações químicas mais fortes ou maior módulo de elasticidade) para o substrato metálico (ligações químicas mais fracas ou menor módulo de elasticidade).

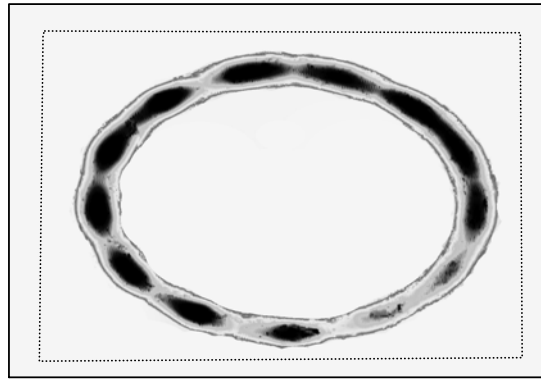
O conjugado AA, nas menores cargas aplicadas (de 32 mN a 100 mN- maior influência do filme), apresentou módulos de elasticidade superiores ao outro conjugado. Este resultado corrobora o fato de filmes bifásicos (estruturas CFC e hexagonal) apresentarem módulos de elasticidade superiores a filmes monofásicos CFC.^[13]

Observa-se que o conjugado AA apresentou razão H/E superior ao conjugado BA em todas as cargas aplicadas, sugerindo maior deformação elástica até a falha em desgaste. Nesse caso, a razão H/E também constitui e deve ser considerada um fator determinante, além da dureza dos filmes, na comparação do desempenho em desgaste dos conjugados.

Tabela 2. Resultados da Penetração Instrumentada.

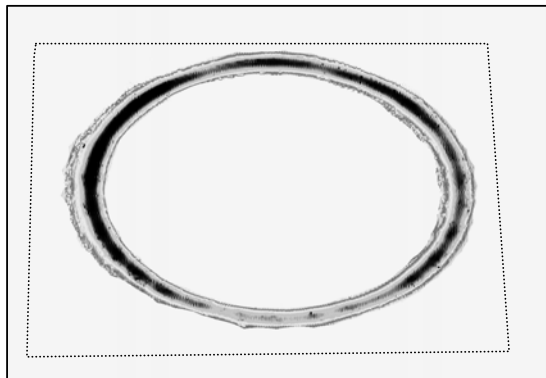
Força (mN)	H _{IT} Médio (GPa)	Desvio-padrão (GPa)	E Médio (GPa)	Desvio-padrão (GPa)
BA Ti _{1-x} Al _x N				
32	30,824	5,754	481,87	67,27
50	20,145	2,781	388,45	67,54
100	6,540	0,402	362,75	58,40
300	3,478	0,156	376,32	20,41
1000	2,752	0,041	396,33	17,36
1900	2,544	0,068	401,55	19,81
AA Ti _{1-x} Al _x N				
32	44,265	7,997	578,59	68,04
50	32,263	5,760	536,39	68,02
100	25,508	2,645	456,68	32,28
300	7,209	0,764	246,54	21,84
1000	3,026	0,041	191,49	5,18
1900	2,916	0,068	203,90	9,81
AISI H13				
1900	2,536	0,10	147,36	42,96

Os volumes e profundidades de vales (correspondentes aos volumes e profundidades dos traços de desgaste) obtidos do perfil após o desgaste (Figuras 5 e 6) evidenciam que o perfil do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN apresentou volume de desgaste (volume de buracos) igual a 0,0531 mm³, 108% superior ao volume do perfil do conjugado AA Ti_{1-x}Al_xN (0,0255 mm³), corroborando a maior taxa de desgaste (volume/distância de deslizamento) do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN, que apresenta menor dureza e menor razão H/E, além de melhor adesão do filme ao aço. Ressalta-se que o perfil do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN apresentou, respectivamente, profundidades de desgaste máxima e média em torno de 30% e 140 % superiores, iguais a 8,67 μm e 4,82 μm, contra 6,67 μm e 2,01 μm do conjugado AA, o que confirma o melhor desempenho do conjugado AA em desgaste. O perfil do aço H13 não temperado sem revestimento apresentou o maior volume de desgaste (0,215 mm³) e a maiores profundidade máxima (23,3 μm) e média (12,4 μm), quando comparado aos conjugados, indicando que a deposição dos filmes BA e AA Ti_{1-x}Al_xN protegeu o aço H13 contra o desgaste.

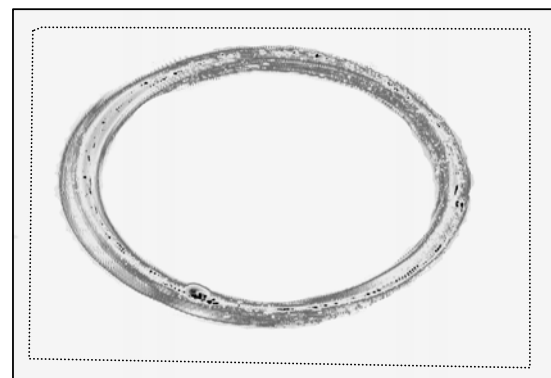


	Hole	
Surface (mm ²)	17.3	0
Volume (mm ³)	0.215	0
Max. depth/height (μm)	23.3	0
Mean depth/height (μm)	12.4	0

Figura 5- Volume e profundidade de vales do perfil do aço H13.



	Hole	
Surface (mm ²)	11	0
Volume (mm ³)	0.0531	0
Max. depth/height (μm)	8.67	0
Mean depth/height (μm)	4.82	0



	Hole	
Surface (mm ²)	12.7	0
Volume (mm ³)	0.0255	0
Max. depth/height (μm)	6.67	0
Mean depth/height (μm)	2.01	0

Figura 6 - Volume e profundidade de vales do perfil dos conjugados Ti_{1-x}Al_xN
a) BA Ti_{1-x}Al_xN b) AA Ti_{1-x}Al_xN.

A Tabela 3, que ilustra os valores das taxas e dos coeficientes de desgaste estimados para os conjugados, demonstra que na mesma carga de desgaste aplicada, o conjugado BA apresentou a maior taxa de desgaste ($8,11 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$) e os maiores coeficientes de desgaste adimensional (K) e dimensional (k),^[1] em comparação com o conjugado AA. Estes resultados indicam e corroboram a menor resistência ao desgaste e maior severidade do desgaste do conjugado BA, dentre os conjugados. Os valores obtidos para os coeficientes de desgaste adimensional (que depende da dureza do material) evidenciam que, em todas as durezas medidas, o conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN apresentou maior severidade de desgaste, o que implica o pior desempenho deste conjugado em desgaste. Este fato é confirmado pelos valores de coeficiente de desgaste dimensional (k) obtidos. Ressalta-se a diferença de uma ordem de grandeza entre os valores deste coeficiente, obtidos quando se compara os conjugados estudados, sugerindo que o conjugado BA apresentou consideravelmente menor resistência ao desgaste do que o conjugado AA, sendo a

resistência ao desgaste igual a $1/k$.^[1] O coeficiente de desgaste dimensional (k), por não depender da dureza do material conjugado, torna-se um parâmetro mais abrangente e preciso para a avaliação da severidade de desgaste, devido à dificuldade existente na escolha do (s) valor (es) de dureza do conjugado, procedimento necessário para a determinação da severidade de desgaste através do coeficiente de desgaste adimensional (K).

Tabela 3- Taxa e coeficientes de desgaste do aço H13 e seus conjugados.

Sistemas	W (N)	S (m)	V (mm ³)	Q (mm ³ /m)	HIT (GPa)	K	k (m ² /N)
Aço H13	7	565,8	0,1905	$3,37 \times 10^{-4}$	2,536	$1,22 \times 10^5$	$4,8 \times 10^{-5}$
BA Ti _{1-x} Al _x N	7	565,8	0,0459	$8,11 \times 10^{-5}$	30,824	$3,57 \times 10^5$	$1,16 \times 10^{-5}$
					20,145	$2,33 \times 10^5$	$1,16 \times 10^{-5}$
					6,540	$7,5 \times 10^4$	$1,16 \times 10^{-5}$
					3,478	$4,02 \times 10^4$	$1,16 \times 10^{-5}$
					2,752	$3,18 \times 10^4$	$1,16 \times 10^{-5}$
					2,544	$2,95 \times 10^4$	$1,16 \times 10^{-5}$
AA Ti _{1-x} Al _x N	7	565,8	0,0252	$4,45 \times 10^{-5}$	44,265	$2,81 \times 10^5$	$6,4 \times 10^{-6}$
					32,263	$2,05 \times 10^5$	$6,4 \times 10^{-6}$
					25,508	$1,62 \times 10^5$	$6,4 \times 10^{-6}$
					7,209	$4,58 \times 10^4$	$6,4 \times 10^{-6}$
					3,026	$1,92 \times 10^4$	$6,4 \times 10^{-6}$
					2,916	$1,85 \times 10^4$	$6,4 \times 10^{-6}$

Através das imagens de composição por raios-x dos traços de desgaste dos sistemas (MEV após o desgaste) (Figuras 7 e 8), observa-se maior ausência de Al (elemento do filme), além da maior presença de Fe exposto na região do traço (elemento do substrato) no conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN, em comparação ao conjugado AA, sendo que o traço de desgaste do primeiro conjugado apresenta maior espessura. Este resultado evidencia o maior desgaste do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN, que apresenta menor dureza e melhor adesão do filme ao substrato, comparando os conjugados estudados. Assim, estes resultados confirmam os resultados obtidos através da perfilometria, o que valida a metodologia utilizada para a determinação do volume de desgaste dos sistemas conjugados estudados.

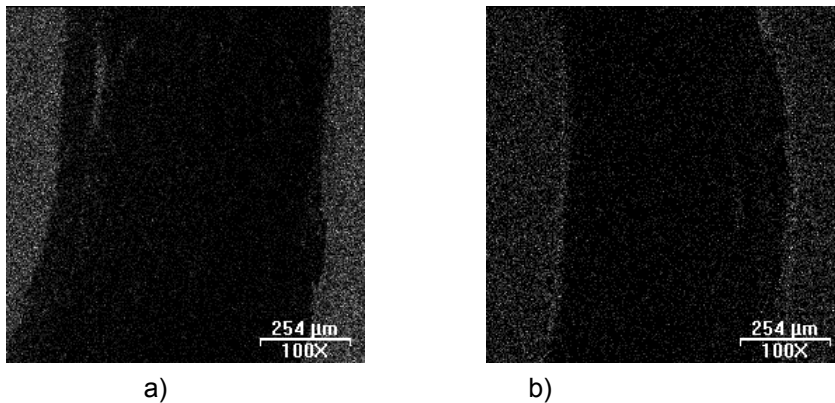


Figura 7 - Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA (100X)- Elemento Al.
a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$.

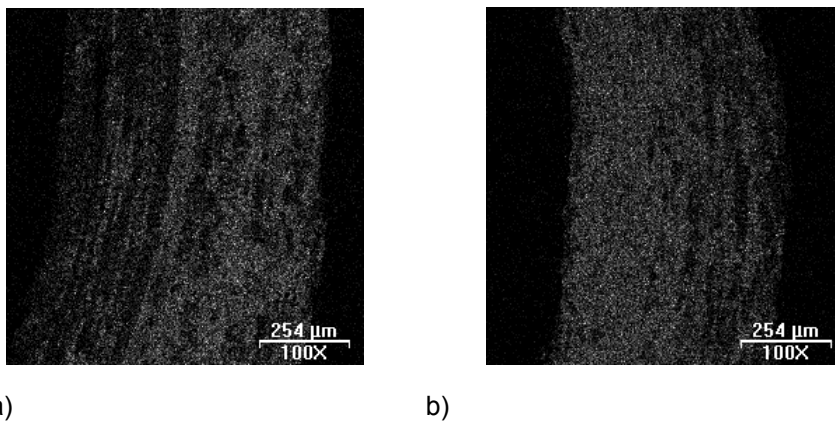


Figura 8 - Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA (100X)- Elemento Fe.
a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$.

4 CONCLUSÕES

1. A utilização de filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ monofásicos (estrutura CFC) e bifásicos (estruturas CFC e hexagonal) tornou-se viável para melhorar o desempenho do aço H13 em desgaste por deslizamento.
2. O teor de alumínio dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ influenciou a sua estrutura cristalina e, conseqüentemente, a dureza do conjugado e o seu desempenho em desgaste. O conjugado AA, que apresentou maior dureza, associada a um alto índice H/E, o que implica maior deformação elástica até a falha, obteve o melhor desempenho em desgaste.
3. Os parâmetros dureza do conjugado e o índice H/E influenciaram mais o desempenho em desgaste dos conjugados estudados, do que a adesão e a espessura dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$.

REFERÊNCIAS

- 1 HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold, 1992. 273p.
- 2 OHNUMA, H., NIHIRA, N., MITSUO, A., TOYODA, K., KUBOTA, K., AIZAWA, T., Effect of aluminum concentration on friction and wear properties of titanium aluminum nitride films, **Surface and Coatings Technology**, v.177-178, p.623-626, 2004.
- 3 TONSHOFF, K., MOHLFELD, A., LEYENDECKER, T., FU, H.G., ERKENS, G., WENKE, R., CSELLE, T., SCHWENCK, M., Wear mechanisms of (Ti_{1-x}Al_x)N coatings in dry drilling, **Surface and Coatings Technology**, v.94-95, p.603-609, 1997.
- 4 HEINKE, W., LEYLAND, A., MATTHEWS, A., BERG, G., FRIEDRICH, C., and BROSZEIT, E., Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scatch and Rockwell – C adhesion tests, **Thin solid films**, v.270, p.431 – 438,1995.
- 5 OLIVER, W.C., PHARR, G.M., Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation : Advances in understanding and refinements to methodology, **Journal of Materials Research**, v.19, p.3-20, 2004.
- 6 Norma ISO /FDIS 14577-1.
- 7 BEAKE, B.D., RANGANATHAN, N., An investigation of the nanoindentation and nano/micro-tribological behaviour of monolayer, bilayer and trilayer coatings on cemented carbide, **Materials Science and Engineering A** v. 423, p. 46–51, 2006.
- 8 HOMMELMAP 4.0.
- 9 KIMURA, A., KAWATE, M., HASEGAWA, H., SUZUKI, T., Anisotropic lattice expansion and shrinkage of hexagonal TiAlN and CrAlN films, **Surface and Coatings Technology** v. 169 –170, p. 367 –370, 2003.
- 10 ZHOU. M.; MAKINO. Y.; NOSE. M.; NOGI. K. Phase transition and properties of Ti-Al-N thin films prepared by rf-assisted magnetron sputtering, **Thin Solid Films**, v. 339, p. 203 – 208, 1999.
- 11 IKEDA, T.; SATOH, H., Phase formation and characterization of hard coatings in the Ti-Al-N system prepared by the cathodic arc ion plating method, **Thin Solid Films**, v. 195, p. 99 – 110, 1991.
- 12 DUCROS, C., BENEVENT, V., SANCHETTE, F., Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools, **Surface and Coatings Technology** v. 163 –164, p. 681–688, 2003.
- 13 KUTSCHEJ, K.; MAYRHOFER, P. H.; KATHREIN, M.; POLCIK, P.; TESSADRI, R.; MITTERER, C.; Structure, mechanical and tribological properties of sputtered Ti_{1-x}Al_xN coatings with 0.5≤x≤0.75, **Surface and Coatings Technology**, 2005.