

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE SOBRE ASPECTOS TRIBOLÓGICOS: DESLIZAMENTO DE PINO DE METAL DURO (WC-Co) COM REVESTIMENTO NITRETO DE TITÂNIO E ALUMÍNIO (TiAlN) SOBRE AÇO ABNT 4340 COM DUREZA 260 HB SEGUNDO A NORMA ASTM G99-05

Ana Paula de Carvalho Costa, anaccosta@ufmg.br¹

Izabella Luiza Santos Almeida, izabella.almeida@tajax.com.br³

Patrícia Lidianne Carneiro Silva, patricia.lidianne@ufmg.br¹

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br²

¹Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Produção (DEP), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG

² Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG

³ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Metalúrgica (DEMET), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG

Resumo: Os revestimentos em ferramentas de corte são amplamente utilizados com o objetivo de aumentar o tempo de vida útil da ferramenta, reduzir o coeficiente de atrito gerado durante o processo e possibilitar o aumento do desempenho dos parâmetros de corte. O presente trabalho busca identificar a influência do revestimento TiAlN sobre o coeficiente de atrito, a taxa de desgaste e a velocidade de deslizamento entre o metal duro (revestido com TiAlN) e o aço ABNT 4340 quando submetidos a condições de atrito em ensaio de pino sobre disco. Foram utilizadas duas velocidades distintas, 75 m/min e 91 m/min, mantendo mesma rugosidade superficial e carga. Os testes foram realizados no Tribômetro Microtest, modelo MT/60/NI e a aquisição de imagens dos pinos e discos por meio de MEV/EDS para caracterização superficial e identificação dos mecanismos de desgaste presentes. Foi verificado que em ambas velocidades houve desgaste do disco e do revestimento do pino, sendo que para a velocidade de 91 m/min o disco teve menor perda de material e maior taxa de desgaste.

Palavras-chave: Revestimento TiAlN, desgaste, Metal Duro, Aço ABNT 4340.

1. INTRODUÇÃO

É difícil imaginar qualquer processo, seja na natureza ou na indústria, que é totalmente livre de atrito (BLAU, 2009). Não obstante à sua complexidade é a importância de seu estudo, pois é inevitável que o contato mecânico gere atrito entre os sólidos e parte da energia transmitida através do contato seja perdida por atrito e deformação. Além disso, a presença de atrito pode resultar em vários efeitos, que são importantes para o comportamento do material durante o contato (TARASOV et al, 2017).

Neste sentido tem-se que o atrito é a resistência ao movimento que é experimentada quando um corpo se move tangencialmente ao outro com o qual está em contato. Assim, o atrito não é uma propriedade do material e sim uma resposta do sistema em forma de forças adesivas e/ou de deformação (HOLMBERG, 2009).

Ainda segundo Holmberg (2009) o desgaste é comumente definido como a remoção de material de superfícies sólidas como resultado de um contato entre superfície que se move sobre outra, sendo os mecanismos típicos a adesão, abrasão, fadiga, desgaste químico e erosivo.

A importância da compreensão e estudo dos fenômenos de atrito e desgaste no que tange a usinagem se deve pela utilização de máquinas-ferramenta cada vez mais modernas e com maior rigidez estrutural, potência disponível e velocidade de operação, permitindo a utilização de condições de usinagem mais robustas e, com isso, aumento significativo da produtividade. (MARCELINO, et al 2004). Entretanto, o processo de desgaste pode ser acelerado devido à submissão das ferramentas de corte a esforços mecânicos elevados, fazendo-se necessária a evolução também da qualidade deste ferramental.

Neste trabalho, o comportamento do revestimento TiAlN foi investigado. Sua dureza é próxima de 3.300 HV (GUHRING, 2017), cuja estrutura é CFC, em que átomos de alumínio substituem os de titânio no retículo, o que o torna apropriado para usinagem de componentes abrasivos (ex: ligas Al-Si). Segundo Marmentini e Beltrão (2007), este é um

revestimento popular para processos de usinagem de alta velocidade, sendo recomendado para operações que requerem tanto elevadas cargas mecânicas no material da ferramenta quanto elevadas temperaturas de corte.

De acordo com o exposto por Holmberg (2009), o revestimento de ferramentas pode ser realizado, dentre os principais processos, por: Plasma Assistido (PA), Depósito de Vapor Químico (CVD), Deposição Física de Vapor (PVD), Deposição assistida por feixe Ion (IBAD), Revestimento assistido de Ion (IAC) e Implantação de Íons (II).

No entanto, o processo de produção do revestimento em análise se deu por processo PVD. Neste processo de deposição atômica, o material é vaporizado a partir de uma fonte sólida ou líquida na forma de átomos ou moléculas, transportado sob a forma de um vapor através de um vácuo (ou baixa pressão), ambiente gasoso (ou plasma) para o substrato onde ele se deposita. (HOLMBERG, 2009).

Tipicamente, os processos PVD são usados para depositar, em substratos variados, camadas na escala nanométrica ou muito espessas, multicamadas com composição variada ou estruturas independentes (BLAU, 2009).

Uma vez conhecido o revestimento, existem três elementos envolvidos na preparação da superfície das espécies de teste de atrito: (a) a forma de contato apropriada, (b) o acabamento adequado da superfície (rugosidade e disposição), e (c) limpeza. É válido ressaltar que processos de usinagem como fresamento e torneamento podem produzir tensões residuais subsuperficiais e endurecimento dos metais, alterando assim a resposta das camadas próximas à superfície, mesmo quando os parâmetros finais de rugosidades forem iguais (BLAU, 2009).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados seis ensaios de pino sobre disco utilizando o Tribômetro Microtest, modelo MT/60/NI (Fig. 1 (b)). Os pinos de topo esférico de Metal Duro (WC-Co) foram revestidos com TiAlN por meio do processamento PVD com grão ultrafino e dimensões descritas na Fig.1 (c). Os discos usados são de aço ABNT 4340, com composição química descrita na Tab. 1, propriedades listadas na Tab. 2 e dimensões presentes na Fig.1 (d).

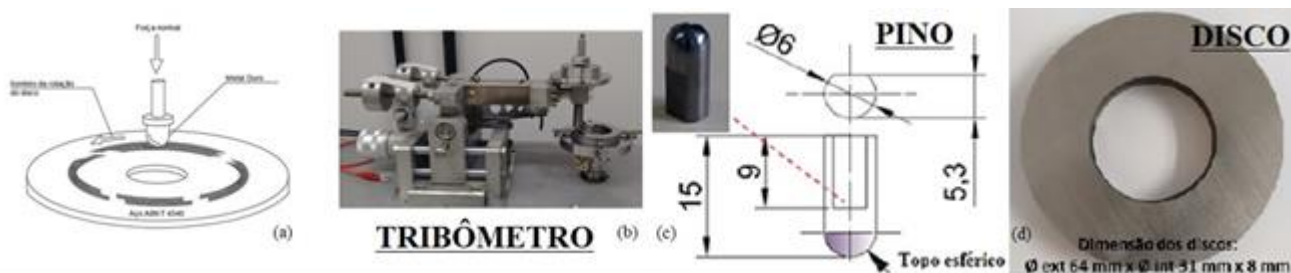


Figura 1. (a) Esquema do experimento tribológico de deslizamento de metal duro sobre aço ABNT 4340 no Tribômetro (b) e dimensões do pino (c) e do disco (d). Fonte: Autor.

Tabela 1. Propriedade do Aço 4340. Fonte: Adaptado de VILLARES, 2017.

Elemento de Liga	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si
% em massa Aço ABNT 4340	0,40	0,70	0,80	0,25	1,80	0,25

Tabela 2. Características e propriedades mecânicas do aço ABNT 4340. Fonte: GERDAU (2003).

Peso específico	Tensão de escoamento	Resistência à tração	Módulo de elasticidade	Coefficiente de Poisson	Alongamento	Redução de área	Dureza
7,85 g/cm ³	470 MPa	745 MPa	190 GPa	0,27-0,30	22%	50%	228 V

A rugosidade superficial das faces dos dois discos foi medida por meio do rugosímetro Mitutoyo, modelo Surftest 301 e o resultado (média de cinco medições em pontos equidistantes) pode ser verificado na Tab. 3.

Tabela 3. Características e propriedades mecânicas do aço ABNT 4340. Fonte: GERDAU (2003).

Face dos discos	Rugosidade Superficial (Ra) (μm)	Rugosidade Superficial (Rz) (μm)	Rugosidade Superficial (Rt) (μm)
	Média	Média	Média
1	0,456 ± 0,140	3,120 ± 0,720	3,900 ± 1,220
2	0,352 ± 0,058	2,320 ± 0,260	3,680 ± 0,780
3	0,432 ± 0,110	2,920 ± 0,610	3,620 ± 0,900
4	0,428 ± 0,080	2,920 ± 0,520	3,800 ± 0,910

Foram utilizadas as faces 1, 3 e 4 dos discos, uma vez que a rugosidade superficial (Ra) da face 2 apresentou discrepância em relação às demais, não permitindo eliminar a análise a rugosidade como variável do processo. Para realização dos ensaios, foram utilizados os seguintes parâmetros: carga normal aplicada de 8N, ambiente não lubrificado e duas velocidades periféricas diferentes: 75 m/min e 91 m/min, em triplicata, com rotação constante (n) de 500 rpm. As faces dos discos foram utilizadas mais de uma vez, sendo variável o diâmetro da pista escolhido, conforme a velocidade periférica estipulada de acordo com a equação que determina a velocidade de corte para ferramentas (Eq. 1). A Tabela 4 apresenta os pares tribológicos utilizados nos seis ensaios realizados.

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V_c = Velocidade de corte (m/min); D = Diâmetro da pista (mm); n = número de rotações por minuto (rpm).

Tabela 4. Parâmetros do teste pino sobre disco. Fonte: Autor.

Ensaio	Pino	Face do disco	Diâmetro da pista (mm)	Velocidade periférica (m/min)
1	1	3	48	75
2	2	1	48	75
3	3	3	58	91
4	4	1	58	91
5	5	4	58	91
6	6	4	48	75

Os dados referentes aos coeficientes de atrito máximo e médio (média aritmética dos valores obtidos), força de atrito, número de revoluções e distância percorrida foram obtidos por meio do software Nanovea Tribometers. Além disso, gráficos que correlacionam coeficiente de atrito e número de revoluções foram gerados para o intervalo de 0 - 12.000 revoluções. Anterior e posteriormente aos ensaios, tanto os pinos quanto os discos foram pesados em uma balança Shimadzu, modelo AX200. Para melhor análise dos resultados e do mecanismo de desgaste, foram calculados o volume desgastado e, conseqüentemente, a taxa de desgaste para cada ensaio. Além disso, posteriormente aos ensaios, foram obtidas imagens dos pinos e discos por análise no MEV e feita caracterização química por EDS.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1. Análise do Coeficiente de Atrito em função das velocidades

A utilização de velocidades diferentes (V_c) com uma mesma carga normal (N) teve como finalidade reproduzir condições reais do processo de usinagem, nas quais muitas vezes o foco é aumentar a velocidade de corte das ferramentas para ganho considerável de produtividade (MARCELINO, et al 2004). Miranda et al (2001) analisou os limites de utilização de brocas de metal duro revestidas com TiAlN visando a melhoria das condições econômicas e produtivas. Este estudo foi embasado em trabalhos de otimização das condições de usinagem desenvolvidos por pesquisadores da UNICAMP e também no catálogo do fabricante da ferramenta. As velocidades inicial e limite de corte estipuladas foram de 70m/min e 163 m/min, respectivamente, e os resultados dos ensaios realizados sem fluido de corte e com avanço constante foram organizados na Tab. 5:

Tabela 5. Análise de condições limite de furação em aço ABNT 4340. Fonte: Adaptado de MIRANDA et al, 2001.

Velocidade de corte (v) [m/min]	Desgaste da ferramenta
70	Nenhum desgaste nas arestas de corte
140	Arredondamento nas pontas de corte, mas nenhum lascamento
280	Quebra

REIS et al (2017) também utilizou a velocidade de 70m/min em um ensaio de pino sobre disco de metal duro sem revestimento (WC-Co) sobre aço ABNT 4340. Neste estudo, os discos com rugosidades superficiais (Ra) de 0,274 e 0,592µm, apresentaram desgaste de intermediário a severo, com coeficientes de desgaste entre 10⁻² e 10⁻⁶.

Para a mesma velocidade de corte de 70m/min, MIRANDA et al (2001) não verificou desgaste na ferramenta, enquanto REIS et al (2017) identificou desgaste abrasivo no disco, mas quase nenhum desgaste no pino. Ensaios realizados em escala laboratorial não conseguem representar fielmente as condições de trabalho de algumas ferramentas, como por exemplo as brocas utilizadas no processo de furação, mas podem trazer informações tribológicas peculiares e auxiliar no entendimento dos mecanismos de desgaste existentes viabilizando a possibilidade de aumento

de vida útil destas. Foram escolhidas as velocidades de 75m/min, em que, segundo a literatura, não haveria desgaste da ferramenta, e 91 m/min, máxima velocidade periférica possível para realização dos testes no tribômetro. Os dados encontrados de distância percorrida, n° de revoluções, força de atrito e coeficientes de atrito máximo e médio foram dispostos na Tab. 6:

Tabela 6. Valores obtidos pelo software Nanovea Tribometers. Fonte: Autor.

Ensaio	Velocidade periférica (m/min)	Distância percorrida (m)	N° total de revoluções	F_{at} (N)	$\mu_{m\acute{a}x}$	μ_{medio}	Desvio padrão
1	75	1768,29	12514,45	12,19	1,52	1,35	0,11
2	75	1766,29	12500,26	8,17	1,02	0,86	0,08
3	91	2276,62	12500,65	10,80	1,35	1,24	0,10
4	91	2277,14	12503,51	5,63	0,70	0,60	0,05
5	91	2277,04	12502,99	9,51	1,19	1,02	0,10
6	75	1766,25	12500,00	9,37	1,17	0,96	0,90

O número de revoluções máximo foi mantido a 12.500 aproximadamente e, portanto, as distâncias percorridas 1.760m para 75m/min (diâmetro da pista de 48mm) e 2.270m para 91m/min (diâmetro de 58mm). Sabe-se que o revestimento TiAlN apresenta alto coeficiente de atrito (HSIEH, 1998), fato que pôde ser percebido em uma análise geral dos valores obtidos. Os coeficientes de atrito médios dos ensaios 2 e 6, cuja velocidade foi de 75m/min, se mostraram próximos - 0,86 e 0,96, mas muito diferentes do encontrado no ensaio 1. Já os valores obtidos para a velocidade de 91 m/min foram muito diferentes. Este fato pode ser explicado pela variação de rugosidade durante o deslizamento, existência de microtrincas, quantidade de partículas de Ti não reagidas ou formação Al_2O_3 devido à oxidação do TiAlN. As Figuras 3 e 4 representam gráficos que correlacionam os coeficientes de atrito medidos instantaneamente durante o ensaio com o número de revoluções realizados.

Blau (2009) identifica oito gráficos que representam tendências do atrito x tempo, os quais também podem ser utilizados para os gráficos de coeficiente de atrito x número de revoluções, uma vez que o comportamento dos gráficos de coeficiente de atrito x tempo gerados, mas não apresentados neste artigo, foi o mesmo. O que mais se assemelha ao comportamento dos 6 gráficos (Fig. 3 e 4) é indicado na Fig. 2.

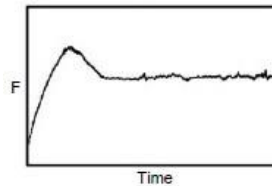


Figura 2. Exemplo gráficos atrito x tempo para ensaio pino sobre disco. Fonte: Adaptado de BLAU, 2009.

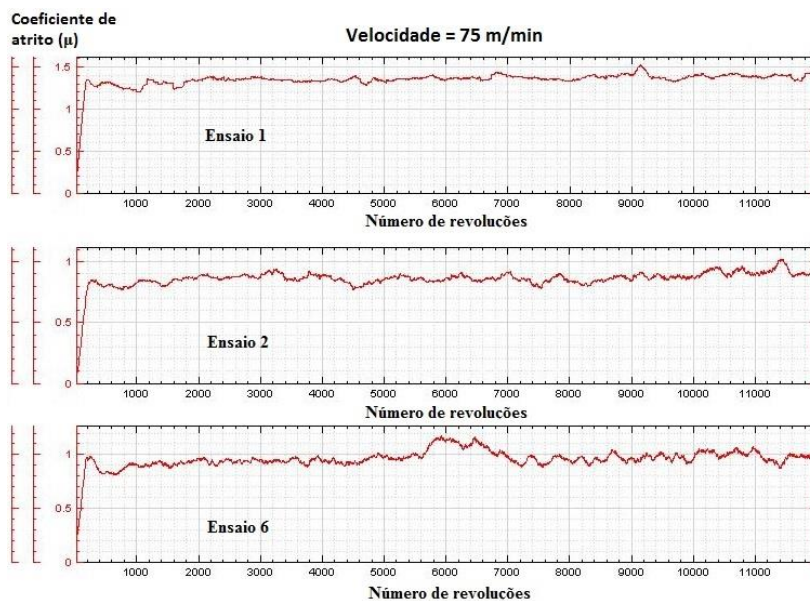


Figura 3. Gráficos do coeficiente de atrito x número de revoluções para velocidade de 75m/min. Fonte: Autor.

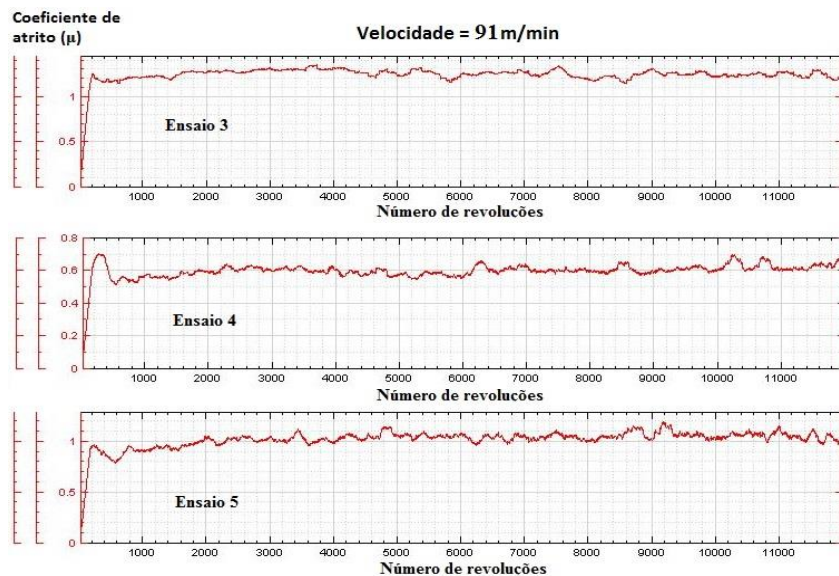


Figura 4. Gráficos do coeficiente de atrito x número de revoluções para velocidade de 91/min. Fonte: Autor.

O formato da curva é afetado não somente pelos materiais envolvidos, mas também por outros parâmetros do processo, e três atributos devem ser considerados para sua análise: formato geral da curva, duração de certas oscilações e a magnitude das possíveis flutuações (BLAU, 2009). De modo geral, todos os gráficos apresentaram o aumento do coeficiente de atrito nas primeiras 400 revoluções devido ao início do deslizamento, em que o atrito é estático e a área de contato aumenta durante a mudança na geometria das superfícies. Quando o atrito passa de estático para cinético, as pontas dos picos (devido à rugosidade considerável) são quebradas, além da quebra da camada de óxido presente na superfície. Logo depois este coeficiente diminui, pois há nova formação de óxido, que funciona como “lubrificante”, iniciando a partir daí o processo de estabilização, que pode ser visto em todas as situações após 3.000 revoluções. Esta faixa estável apresentou pequenas flutuações de amplitude de no máximo 0,3, que pode ser explicada pelo possível efeito stick slip, em que os debris formados aderem e deslizam entre os dois materiais em contato. Os valores obtidos não seguiram nenhuma tendência com o aumento da velocidade, podendo concluir que o coeficiente de atrito não apresentou variação proporcional à velocidade periférica.

3.2. Variação de massa e taxa de desgaste

As velocidades periféricas foram escolhidas para verificação da ocorrência do desgaste e seu grau de severidade em cada uma das situações. Os valores de massa obtidos foram tratados estatisticamente, sendo determinada a média e desvio padrão, além das perdas de massa, conforme Tab. 7 e 8.

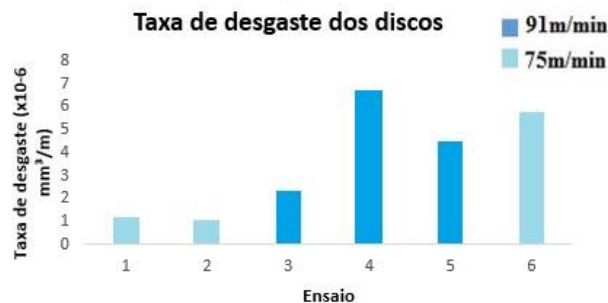
Tabela 7. Perda de massa dos discos por ensaio. Fonte: Autor.

Ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Antes Média (g)	Depois	Perda de massa (g)
1	75	149,9738 $\pm$ 0,001	149,9572 $\pm$ 0,007	0,017
2	75	149,8063 $\pm$ 0,002	149,7920 $\pm$ 0,005	0,015
3	91	149,9572 $\pm$ 0,007	149,9531 $\pm$ 0,002	0,004
4	91	149,7920 $\pm$ 0,005	149,7801 $\pm$ 0,000	0,012
5	91	149,9531 $\pm$ 0,002	149,9454 $\pm$ 0,002	0,008
6	75	149,9454 $\pm$ 0,002	149,9372 $\pm$ 0,002	0,008

Tabela 8. Perda de massa dos pinos por ensaio. Fonte: Autor.

Ensaio	Antes dos ensaios	Depois dos ensaios	Perda de massa (g)
	Média(g)	Média(g)	
1	5,2549 $\pm$ 0,0002	5,2548 $\pm$ 0,0000	0,0001
2	5,1872 $\pm$ 0,0001	5,1873 $\pm$ 0,0001	-0,0001
3	5,2347 $\pm$ 0,0000	5,2346 $\pm$ 0,0001	0,0001
4	5,2548 $\pm$ 0,0000	5,258 $\pm$ 0,0001	0,0000
5	5,1873 $\pm$ 0,0001	5,1872 $\pm$ 0,0001	0,0000
6	5,2548 $\pm$ 0,0001	5,2346 $\pm$ 0,0001	0,0000

Dentro da faixa de velocidade de 75 e 91 m/min não foi observada diferença significativa de perda de massa dos pinos e dos discos. O volume desgastado foi calculado dividindo a variação de massa do disco pelo peso específico (7,85 g/cm³), e a taxa de desgaste obtida pela razão entre o volume desgastado e a distância percorrida, conforme apresentado na Tab. 9 e no gráfico de taxa de desgaste por ensaio (Fig. 5).

**Figura 5: Gráfico da perda de massa e taxa de desgaste dos discos por ensaio. Fonte: Autor.****Tabela 9. Parâmetros e resultados obtidos nos ensaios. Fonte: Autor.**

Ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Variação Massa do disco [g]	Volume Desgastado [mm³]	Distância percorrida [mm]	Taxa de Desgaste do Disco [mm³/mm]
1	75	0,017	2,166	1768290	$1,2247 \times 10^{-6}$
2	75	0,015	1,911	1766290	$1,0818 \times 10^{-6}$
3	91	0,004	0,510	2276620	$2,2382 \times 10^{-6}$
4	91	0,012	1,529	2277140	$6,7131 \times 10^{-6}$
5	91	0,008	1,019	2277040	$4,4756 \times 10^{-6}$
6	75	0,008	1,019	1766250	$5,7699 \times 10^{-6}$

Os resultados explicitam que os desgastes se apresentaram como suave nos discos, pois as taxas de desgaste ficaram na faixa de 10^{-6} . Tanto a menor quanto a maior taxa foram obtidas para a face 1 (ensaio 2 e 4), que apresentou maior rugosidade (Ra). A maior taxa de desgaste ($6,7131 \times 10^{-6}$) refere-se à maior velocidade periférica. Este fato possivelmente está relacionado tanto com a maior distância percorrida, uma vez que o diâmetro da pista é maior, quanto com a perda considerável de massa neste ensaio. A influência desta diferença entre distâncias percorridas para as duas velocidades foi evidenciada no ensaio 1, que teve quase a menor taxa de desgaste mesmo e maior perda de massa.

3.3. Desgaste

A análise do possível desgaste nos pinos foi feita com auxílio de imagens MEV e caracterização química EDS. É possível verificar nas Fig. 6 e 7 que houve uma alteração na estrutura superficial dos pinos no local do contato com o disco, sendo essa confirmada pela diferente coloração e pela composição química dessas áreas (Fig. 8 a 13). É possível sugerir que:

- a região circular mostrada nas imagens indica a área de contato dos ensaios (1);

- as regiões brancas indicam a ausência de revestimento, sugerindo desgaste e delaminação deste ⁽²⁾;
- as regiões cinza, próximas às partes brancas, indicam o início de ruptura do revestimento ⁽³⁾;
- as protuberâncias indicam a adesão de material do disco ⁽⁴⁾

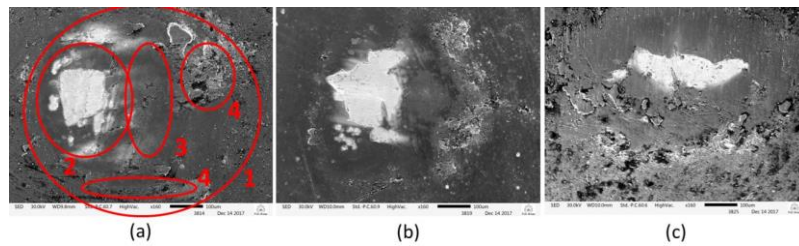


Figura 6. Imagens dos pinos nas regiões de contato pino-disco para ensaios com velocidade de 75 m/min, sendo: (a): ensaio 1, (b): ensaio 2, e (c): ensaio 6. Fonte: Autor.

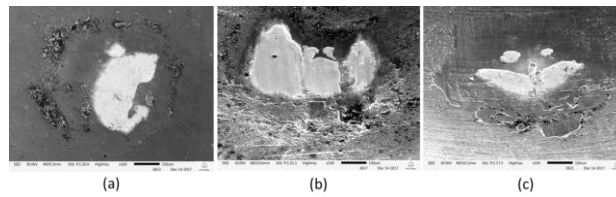


Figura 7. Imagens dos pinos nas regiões de contato pino-disco para ensaios com velocidade de 91 m/min, sendo: (a): Ensaio 3, (b): ensaio 4, e (c): ensaio 5. Fonte: Autor.

Além da análise visual, outro fato que corrobora as sugestões acerca das imagens dos pinos é a composição química. Nas áreas claras, deveria ser percebido somente o material do revestimento TiAlN (ou em sua predominância). Entretanto, foram identificados, para todos os casos, a presença do material do substrato (metal duro – Wc-Co), conforme pode ser verificado nas Fig. 8 a 13, indicando o desgaste e/ou delaminação do revestimento.

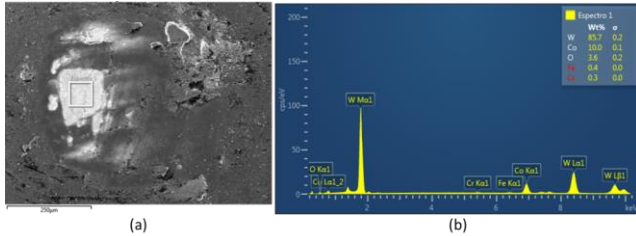


Figura 8: Análise da composição química da área clara do pino do ensaio 1 (velocidade: 75 m/min). (a) área analisada e (b) composição química. Fonte: Autor.

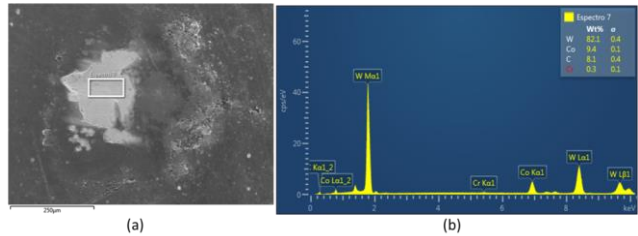


Figura 9: Análise da composição química da área clara do pino do ensaio 2 (velocidade: 75 m/min). (a) área analisada e (b) composição química. Fonte: Autor.

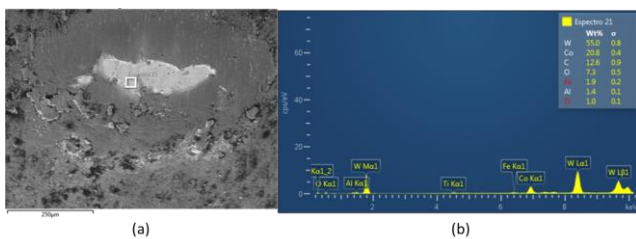


Figura 10: Análise da composição química da área clara do pino do ensaio 6 (velocidade: 75 m/min). (a) área analisada e (b) composição química. Fonte: Autor.

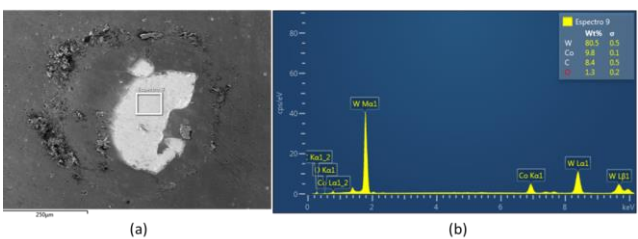


Figura 11: Análise da composição química da área clara do pino do ensaio 3 (velocidade: 91 m/min). (a) área analisada e (b) composição química. Fonte: Autor.

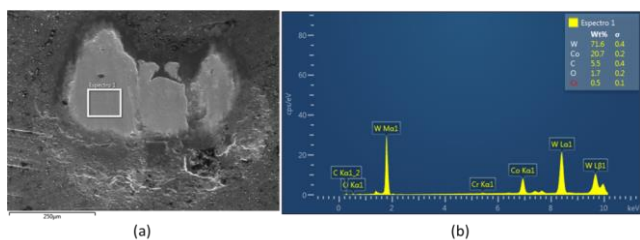


Figura 12: Análise da composição química da área clara do pino do ensaio 4 (velocidade: 91 m/min). (a) área analisada e (b) composição química. Fonte: Autor.

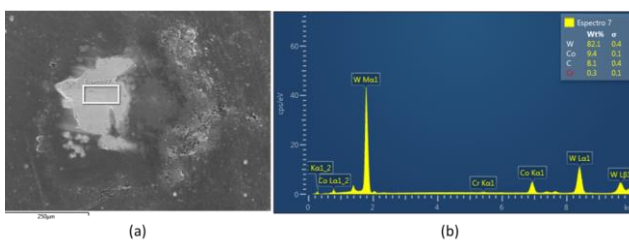


Figura 13: Análise da composição química da área clara do pino do ensaio 5 (velocidade: 91 m/min). (a) área analisada e (b) composição química. Fonte: Autor.

Outra análise que pode ser confirmada pela análise EDS é que as regiões cinza, próximas às partes mais claras, indicam o início de ruptura do revestimento. Para essas áreas, a análise indicou a presença de materiais dos pinos, do revestimento e do disco, em todos os casos. A composição química das protuberâncias também foi analisada e comprovada a presença do material do disco, indicando a adesão deste material nos pinos, conforme Fig. 14 a 19. A adesão é um fenômeno recorrente, em que duas superfícies são pressionadas uma contra a outra, onde são formadas ligações entre os materiais, sendo necessário exercer certa pressão para separá-las novamente (BHUSHAN, 2013).

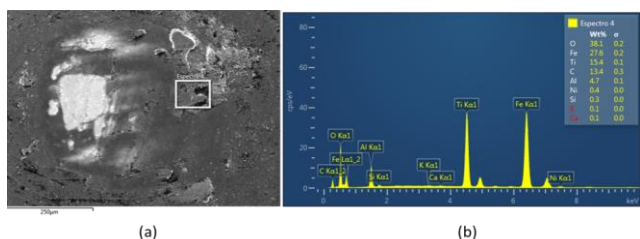


Figura 14: Análise da composição química das protuberâncias do pino do ensaio 1 (velocidade: 75 m/min). (a) área analisada e (b) composição química.
Fonte: Autor.

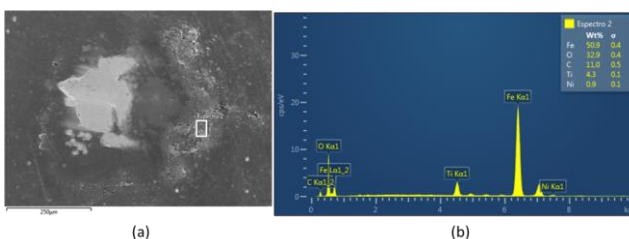


Figura 15: Análise da composição química das protuberâncias do pino do ensaio 2 (velocidade: 75 m/min). (a) área analisada e (b) composição química.
Fonte: Autor.

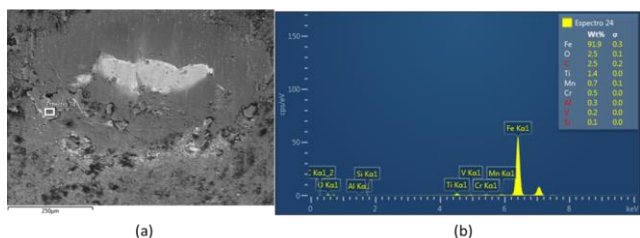


Figura 16: Análise da composição química das protuberâncias do pino do ensaio 6 (velocidade: 75 m/min). (a) área analisada e (b) composição química.
Fonte: Autor.

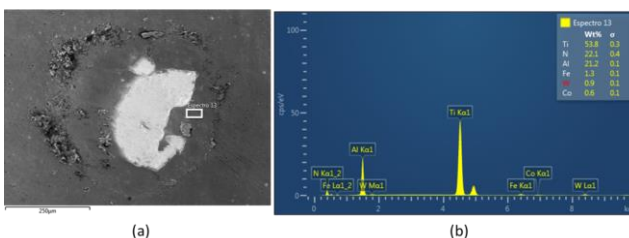


Figura 17: Análise da composição química das protuberâncias do pino do ensaio 3 (velocidade: 90 m/min). (a) área analisada e (b) composição química.
Fonte: Autor.

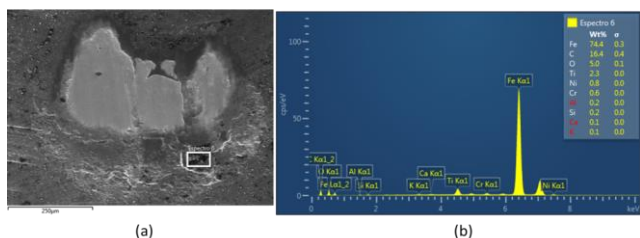


Figura 18: Análise da composição química das protuberâncias do pino do ensaio 4 (velocidade: 90 m/min). (a) área analisada e (b) composição química. Fonte: Autor.

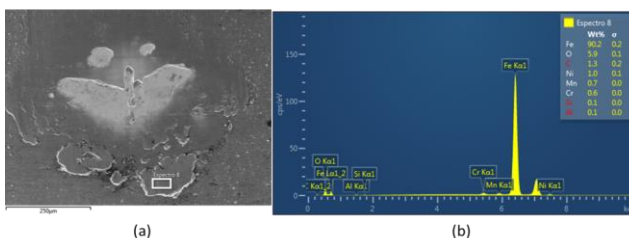


Figura 19: Análise da composição química das protuberâncias do pino do ensaio 5 (velocidade: 90 m/min). (a) área analisada e (b) composição química.
Fonte: Autor.

Já o desgaste ocorrido nos discos pode ser confirmado, além da perda de massa, pelas imagens MEV, indicando as pistas de desgaste (Fig. 20 e 21).

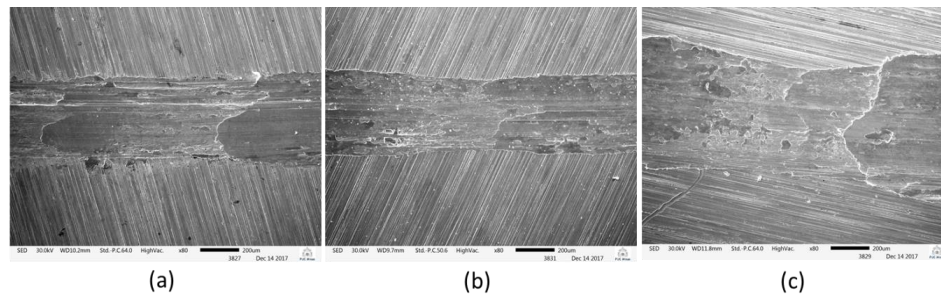


Figura 20: Imagens da pista de deslizamento dos ensaios realizados com velocidade de 75 m/min, sendo: (a) ensaio 1, (b): ensaio 2 e (c): ensaio 6. Fonte: Autor.

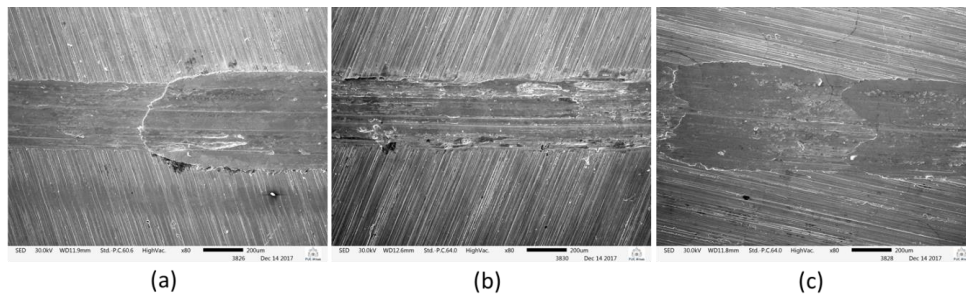


Figura 21: Imagens da pista de deslizamento dos ensaios realizados com velocidade de 91 m/min, sendo: (a) ensaio 3, (b): ensaio 4 e (c): ensaio 5. Fonte: Autor

Nos três ensaios supracitados, há formação de sulcos no sentido de rotação do pino com profundidades diferentes. Essa análise, somada à informação de perda de massa, indica que houve abrasão com intensidades diferentes nas pistas dos discos. Nas Figuras 20 e 21, pode-se identificar o aço 4340 recalcado na interface substrato/pista, além de protuberâncias no interior da pista, que podem ser identificadas como material que aderiu ao pino e depois desprendeuse à medida que o movimento rotativo prevaleceu ou como formação de outros compostos, como óxidos dos elementos ali presentes. Percebe-se também que algumas regiões se encontram achatadas indicando deformação plástica dos materiais presentes e/ou possível trepidação do pino, como se este estivesse tendo áreas de contato reais diferentes ao longo da trajetória. Desta forma, pode-se concluir que o mecanismo predominante de desgaste nos discos é abrasivo e que houve adesão também de material no pino.

4. CONCLUSÃO

Após os ensaios, caracterização das superfícies e análises finais, foi possível verificar que:

- os pinos de metal duro revestidos com TiAlN sofreram um pequeno desgaste, mesmo sem uma perda significativa de massa, em todos os testes;
- o fato da não variação de massa nos pinos poderia ser explicada pelo fato de ter material dos discos aderido a eles – fato que poderia compensar a perda de massa (revestimento);
- para ambas velocidades, foi possível verificar que houve desgaste abrasivo nos discos;
- visualmente, não houve maior intensidade de desgaste para as velocidades periféricas de 91 m/min, porém para essa velocidade houve menor perda de massa e maior taxa de desgaste;
- no caso da velocidade mais alta (91 m/min), menor perda de massa e menor taxa de desgaste (ensaio 3) pode ser explicada pela distância percorrida ser em média 22,4% maior em comparação à velocidade mais baixa (75 m/min).

5. REFERÊNCIAS

- Bhushan, B., 2013, “Introduction to Tribology”. 2ed, Ed. John Wiley & Sons, New Jersey, United States of America.
- Blau, P. J., 2009, “Friction science and technology : from concepts to applications”. 2ed, Ed. CRC Press Taylor & Francis Group, New York, United States of America.
- Gerdau, 2002, “Manual de aços”, Brazil.

- Guhring, 2017, "TIALN (Nitreto de Titânio e Alumínio)", Disponível em: <<http://e.guhring.com/ProductsServices/CoatingServices/TiAlN/>> Acesso em nov/17.
- Holmberg, K and Matthews, A, 2009, "Coating Tribology Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering", 2ed, Ed. Elsevier Science, Amsterdam, Germany.
- Hsieh, J.H., Liang, C., Yu, C.H. and Wu, W., 1998, "Deposition and characterization of TiAlN and multi-layered TiN/TiAlN coatings using unbalanced magnetron sputtering. Surface and Coatings Technology", Ed. Elsevier Science. 1ed, Ed. Elsevier Science, Singapore and China.
- Marcelino, A. P., Pierini, H. de M., Mochizuki, S. S. e Shroeter, R. B., 2004, "Análise do comportamento das ferramentas de cerâmica à base de Si₃N₄ no processo de torneamento de ferro fundido cinzento", Proceedings of 11th Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica (CREEM), Rio de Janeiro, Brazil.
- Marmellini, M.M. e Beltrão, P.A.C., 2007, "Análise comparativa do desempenho de brocas helicoidais revestidas com TiAlN e AlCr na furação do aço SAE 4144 beneficiado", Proceedings of 4th Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, São Paulo, Brazil.
- Miranda, G. W. A., Coppini, N. L., Brafa, D. U. e Diniz, A. E., 2001, "Contribuição ao processo de furação com brocas de metal duro revestidas", Proceedings of 1st Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Paraná, Brazil.
- Reis, B.C.M., Amaral, G.R. e Costa, A.P.C., 2017, "Análise da Influência da Rugosidade Superficial (Ra) sobre aspectos tribológicos: deslizamento de pino de metal duro (WC-Co) sobre aço ABNT 4340 segundo a Norma ASTM G99-05", Proceedings of 9th Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Santa Catarina, Brazil.
- Tarasov S. Yu., Filippov A.V., Kolubaev, E.A. and Kalashnikova T.A., 2017, "Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy" Tribology International, Russia.
- Villares, 2017, "Aço ferramenta para aplicação mecânica", Disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Aplicacoes/Aplicacao-mecanica/V4340T>> Acesso em nov/17.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANALYSIS OF SPEED INFLUENCE ON TRIBOLOGICAL ASPECTS: SLIDE OF HARD METAL (WC-Co) PIN COVERED WITH TITANIUM AND ALUMINUM NITRIDE ON ABNT 4340 STEEL WITH HARDNESS 260HB ACCORDING TO ASTM STANDARD G99-05

Ana Paula de Carvalho Costa, anaccosta@ufmg.br¹
Izabella Luiza Santos Almeida, izabella.almeida@tajax.com.br³
Patrícia Lidiane Carneiro Silva, patricia.lidiane@ufmg.br¹
Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br²

¹Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Produção (DEP), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG

² Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG

³ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Metalúrgica (DEMET), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG

Abstract. *The cutting tool coatings are widely used for the purpose of increasing tool life by reducing the coefficient of friction generated during the process and increasing the performance of the cutting parameters. The present work aims to identify the influence of the TiAlN coating on the friction coefficient, the wear rate and the slip speed between the hard metal (coated with TiAlN) and ABNT 4340 steel when submitted to pin-on-disk friction tests. Two different speeds were used, 75 m/min and 91 m/min, maintaining the same surface roughness and load. The tests were performed in the MT/60/NI Microtest Tribometer and the acquisition of pin and disk images by MEV/EDS for surface characterization and identification of the present wear mechanisms. It was verified that at both speeds the disk and pin coating were worn, and at the speed of 91 m/min the disk presented less material loss and higher wear rate.*

Keywords: TiAlN coating, wear, hard metal, ABNT 4340 steel.