

ESTUDO DO MECANISMO DE DESGASTE DURANTE O DESLIZAMENTO DE METAL DURO COM E SEM REVESTIMENTO CONTRA O AÇO ABNT 4340 NORMALIZADO

Augusto Moura Martins, augusto.mmartins@yahoo.com.br¹

Bruna Aparecida Rezende, brunarezende12@yahoo.com.br²

Carlos Artur Alevato Leal, carlosleal4@hotmail.com¹

Thiago Meireles Grabe, tmgmeireles@hotmail.com¹

Alexandre Mendes Abrão, abrao@demec.ufmg.br¹

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

Geralda Cristina Godoy, cristinagodoyufmg@gmail.com³

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PPGMEC, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte,

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte,

³Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte,

Resumo: A tribologia é o ramo da ciência que se dedica ao estudo do atrito, desgaste e lubrificação entre superfícies em contato. Em diversos processos, como, na usinagem, tem-se o movimento relativo entre superfícies da peça e da ferramenta de corte e torna-se de suma importância estudar o desgaste. Um dos materiais comumente empregado em operações de usinagem é o aço ABNT 4340, o qual é frequentemente utilizado nas indústrias automobilística, aeronáutica, naval, de edificações e química, entre outras. O presente trabalho tem por objetivo o estudo sobre os mecanismos de desgaste atuantes durante o deslizamento (ensaio de pino sobre disco) de pinos de metal duro (um sem revestimento, um revestido com nitreto de titânio - TiN e outro com nitreto titânio alumínio - TiAlN) contra o aço ABNT 4340. Os testes foram realizados no tribômetro modelo Microtest, SMT-A/0100 e os procedimentos experimentais seguiram a norma ASTM G99. Os resultados mostraram que o menor desgaste nem sempre está associado ao menor coeficiente de atrito, ou seja, o metal duro revestido com TiAlN apresentou maior valor de coeficiente de atrito, mas propiciou menor perda de massa do disco de aço ABNT 4340. Abrasão foi o mecanismo de desgaste predominante nos discos e adesão, nos pinos.

Palavras-chave: Mecanismos de desgaste, metal duro, aço ABNT 4340, coeficiente de atrito, ensaio de pino sobre disco.

1. INTRODUÇÃO

A tribologia é definida como a ciência e tecnologia de superfícies em contato com movimento relativo, incluindo o estudo do atrito, desgaste e lubrificação (Hutchings, 1992). Em vários setores industriais o estudo de pares tribológicos se faz essencial, como na indústria automobilística (Zabala *et al.*, 2017), de ferramentas de usinagem e conformação (Bobzin, 2016) e nuclear (Alat *et al.*, 2016), entre outras.

Rabinowicz (1995) cita que a importância do atrito e desgaste nos setores industriais pode representar até 0,5% de todo Produto Interno Bruto dos países industrializados devido ao desconhecimento em como minimizar o impacto das perdas causadas pelo atrito. Sendo assim, os estudos sobre a aplicação e desenvolvimento dos pares tribológicos, revestidos ou não, se faz essencial.

Conforme mostra a Equação (1), a força de atrito é proporcional ao coeficiente de atrito e à carga normal (Hutchings, 1992). A diminuição do coeficiente, portanto, leva a uma diminuição da força.

$$F_{at} = \mu * w \quad (1)$$

Onde:

F_{at} : força de atrito (N)

μ : coeficiente de atrito

w: carga normal (N)

Uma das maneiras de se controlar o coeficiente de atrito é a aplicação de revestimentos. Atualmente existem diferentes tipos de revestimento e métodos de deposição. Um processo comumente utilizado é o PVD (Deposição Física de Vapor), no qual o material é vaporizado a partir de uma fonte sólida ou líquida, transportado na forma de um vapor através de um ambiente a vácuo ou plasma para o substrato onde se condensa formando camadas. Geralmente, o processo PVD é utilizado para camadas de poucos nanômetros até centenas de nanômetros de espessura, sendo também utilizado para várias camadas de diferentes materiais de revestimento. A taxa de deposição pode variar entre 1 a 100 nanômetros por segundo (Mattox, 1998).

Dentre os principais tipos de revestimentos que podem ser obtidos por meio da técnica PVD tem-se o Nitreto de Titânio (TiN) e o Nitreto de Alumínio Titânio (TiAlN), os quais são comumente usados em ferramentas de usinagem, moldes para injeção de polímeros e instrumentos cirúrgicos. O revestimento de TiAlN apresenta maior dureza a temperatura ambiente e sob altas temperaturas quando comparado com o revestimento de TiN. A dureza está relacionada com tensão residual do revestimento. Tensões residuais de compressão muito baixas podem causar pouca adesão ao substrato, já altos valores de tensão residual de tração podem favorecer a propagação de trincas. Quando a característica observada é a resistência a oxidação, o revestimento de TiAlN é superior devido à formação de uma camada de óxido de alumínio que previne a difusão. Contudo, deve-se observar a temperatura, pois sob altas temperaturas pode haver a formação de rutila (TiO_2), que prejudica o desempenho o óxido de alumínio. Quanto à utilização em ferramentas de corte, as ferramentas revestidas com TiAlN apresentam vida útil superior às revestidas com TiN, mesmo no corte a seco. Esse fato se deve às ótimas características de estabilidade de oxidação e microdureza do revestimento (Paldey e Deevi, 2003; Mellor, 2006). A Figura 1 compara a vida útil (medido em termos de desgaste de flanco) dos revestimentos TiAlN e TiN na usinagem do aço SAE 1045. Nota-se uma taxa de desgaste mais acentuada para a ferramenta revestida com TiN e melhor desempenho para a ferramenta revestida com TiAlN, pelos motivos expostos acima. A Tabela 1 corrobora tais resultados por meio da comparação de algumas propriedades dos revestimentos de TiAlN e TiN.

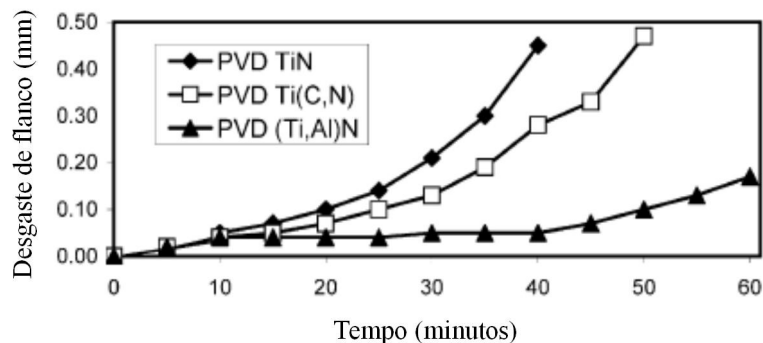


Figura 1 – Desgaste de flanco na usinagem do aço SAE 1045 (adaptado de Paldey e Deevi, 2003)

Tabela 1. Características dos revestimentos TiN e TiAlN (adaptada de Inspektor e Salvador, apud Bobzin, 2016).

Avaliação	Estabilidade química	Estabilidade de oxidação	Dureza a temperatura ambiente	Dureza a quente
++	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN
+	TiN	TiN	TiN	TiN

O termo desgaste se refere à perda progressiva de material de uma superfície sólida e seu estudo é essencial para viabilizar economicamente os processos industriais. O estudo sobre o desgaste de uma superfície é realizado por meio da análise do mecanismo de desgaste predominante no sistema tribológico. Existem quatro mecanismos de desgaste principais: fadiga superficial, abrasão, reação triboquímica e adesão, exemplificados na Figura 2. A fadiga superficial se origina do carregamento dinâmico nas regiões superficiais dos materiais, provocando a formação de fendas (trincas) e a sua subsequente propagação. A abrasão ocorre predominantemente em sistemas tribológicos em que os elementos apresentam valores de dureza muito diferentes. O material mais duro atua de forma abrasiva, pois os picos ou partículas mais duras penetram na superfície mais macia, formando canais e sulcos nesta superfície. Na reação triboquímica ocorre uma reação química na superfície de contato com o ambiente ou material intermediário, provocando mudanças

na superfície e influenciando o processo de desgaste. Adesão é a interação entre um par tribológico, no qual o contato sobre pressão favorece ligações atômicas. Posteriormente, o material de uma superfície será separado e permanecerá aderido à outra superfície. Embora cada mecanismo de desgaste possa ocorrer sozinho, o exame de danos de desgaste indica que há quase sempre uma superposição de vários deles, dificultando qualquer análise e prevenção de desgaste (Mang, Bobzin e Bartels, 2011). A Figura 3 demonstra a influência da temperatura de usinagem (velocidade de corte, avanço, etc.) sobre o desgaste total de ferramentas de corte e a contribuição individual de cada mecanismo.

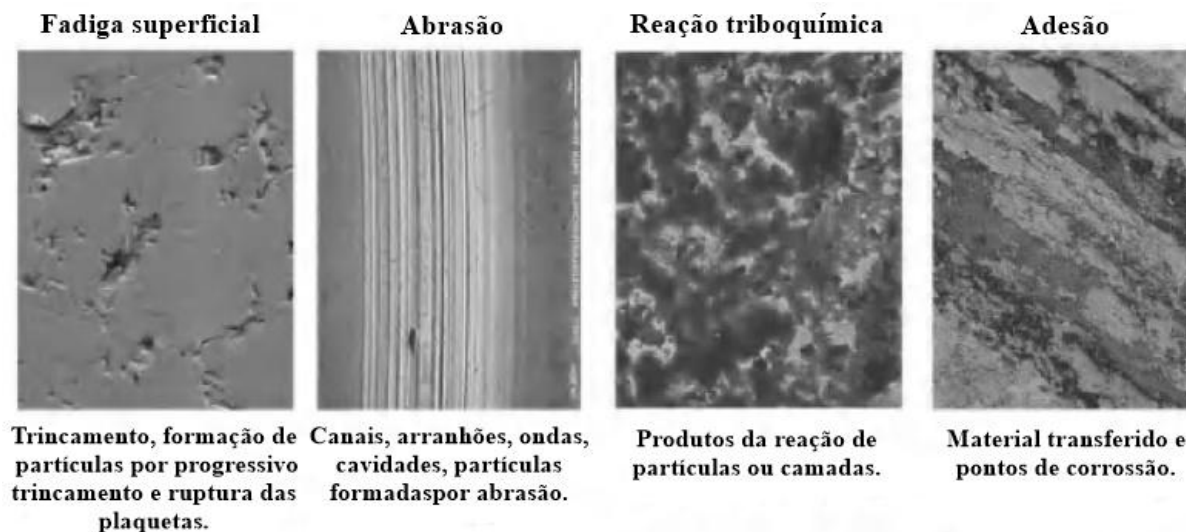


Figura 2 – Mecanismos de desgaste (adaptado de Mang, Bobzin e Bartels, 2011)

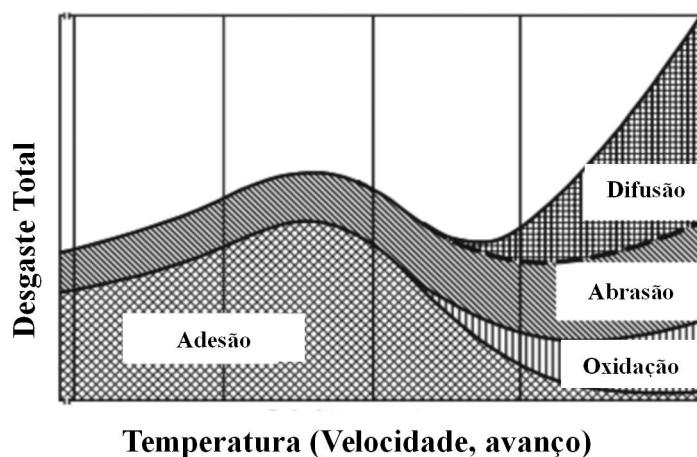


Figura 3 – Influência da temperatura de corte sobre os mecanismos de desgaste (adaptado de König e Klocke, 1997)

O presente estudo tem por objetivo comparar o coeficiente de atrito (μ) e desgaste utilizando de pinos de metal duro (sem revestimento, revestido com TiN e TiAlN) deslizando sobre um disco de aço ABNT 4340.

2. METODOLOGIA

O estudo foi realizado com metal duro e revestimentos comercialmente utilizados. Tendo em vista a comparação entre os revestimentos, os pinos foram os únicos parâmetros variados de um teste para o outro.

2.1. Materiais Utilizados

Foram utilizados três pinos de metal duro, sendo um sem revestimento, um com revestimento de TiN e outro com revestimento de TiAlN. O disco utilizado foi fabricado em aço ABNT 4340 normalizado com dureza de 193 HV e desvio médio aritmético $R_a = 0,49 \mu\text{m}$. Este material foi escolhido devido a sua grande aplicação na indústria metal-mecânica em função de sua alta resistência, mesmo no estado normalizado. A faixa de composição química do aço ABNT 4340 consta na Tab. 2 e na Tab. 3 são apresentadas algumas propriedades dos pinos de metal duro. Com relação

aos revestimentos eles também possuem durezas diferentes, entre 27 e 33 GPa para o TiN e entre 32 e 38 GPa para o TiAlN (Oelikon Balzers, 2018).

Tabela 2. Faixa de composição química do aço ABNT 4340 (ASM International, 1997).

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
0,38-0,43	0,15-0,35	0,60-0,80	≤0,035	≤0,040	0,70-0,90	0,20-0,30	1,65-2,00

Tabela 3. Propriedades do Metal duro (Ceratizit, 2016).

Código ISO	Ligante (m%)	Densidade (g/cm ³)	Dureza HV30	Tensão de ruptura transversal (MPa)	K _{IC} (Mpa*m ^{1/2})
K10 – K20	8,2	14,55	1930	4400	9,2

Os pinos foram feitos com topo esférico de 6 mm de diâmetro e mantidos em contato constante com o disco de aço ABNT 4340 com a aplicação de uma carga estática. O movimento relativo entre o pino e o disco se dá pelo movimento de rotação do disco, que permite a formação de uma pista de contato circular. O teste de pino sobre disco foi realizado em um tribômetro Microtest SMT-A/0100-MT/60/Ni de acordo com a norma ASTM G99 – 05 e o equipamento utilizado com um detalhe para o disco pode ser visualizado na Fig. 4.



Figura 4. Tribômetro e montagem utilizada no ensaio pino sobre disco.

2.2. Condições Experimentais

A velocidade de deslizamento (80 m/min), carga normal (5 N) e distância de deslizamento (3680 m) foram as mesmas para os três pinos de metal duro. O valor da velocidade de deslizamento foi escolhido utilizando como base valores de velocidades de corte utilizadas na operação de furação. Para determinação do desgaste em cada uma das situações, as massas dos pinos e dos discos foram medidas em uma balança de precisão Shimadzu modelo AX200, antes e depois de cada teste. Além disso, foram avaliadas as imagens das regiões de contato no pino e da pista presente no disco para que se pudesse visualizar os mecanismos de desgaste presentes.

3. RESULTADOS

Inicialmente serão apresentados os resultados de coeficiente de atrito, coeficiente de desgaste e variação de massa para os pinos e discos. Posteriormente, serão analisadas as imagens das regiões de contato entre os pinos e o disco.

3.1. Coeficiente de Atrito

Por meio da Figura 5 pode-se observar que para uma mesma distância de deslizamento, o menor coeficiente de atrito médio foi observado para o pino de metal duro revestido com TiN. Por outro lado, o maior valor de coeficiente de atrito médio foi observado para o pino revestido com TiAlN, não se diferenciando muito do sem revestimento. De forma geral, o pino com TiN apresentou o menor coeficiente de atrito médio, o que provocou menores forças de atrito e, conseqüentemente, menor desgaste no disco. Já para o pino com TiAlN o coeficiente de atrito médio foi maior, porém o coeficiente de desgaste foi intermediário. Portanto, observa-se que o coeficiente de desgaste não está relacionado somente com o coeficiente de atrito. Conforme Paldey e Deevi (2003), o TiAlN tem maior resistência à oxidação (800 °C) quando comparado ao TiN (cerca de 600 °C). Acima da temperatura de oxidação do TiAlN há a formação de Al₂O₃, óxido que apresenta uma alta dureza e que contribui para a diminuição do coeficiente de atrito. No caso deste trabalho, considera-se que a velocidade de deslizamento utilizada não foi suficiente para atingir a temperatura de formação deste óxido. Tal fato justifica o menor coeficiente de atrito para o TiN em relação ao TiAlN para as condições de teste utilizadas.

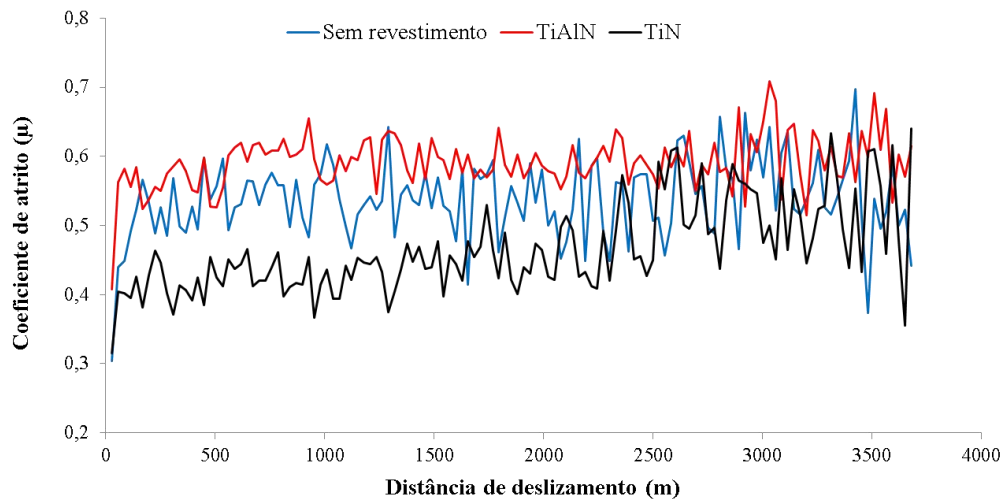


Figura 5. Gráfico do coeficiente de atrito versus distância percorrida.

3.2. Coeficiente de Desgaste

Uma maneira simples e amplamente usada para descrever a severidade do desgaste em uma superfície é a utilização da equação de Archard - Eq. (2). Esta equação permite o cálculo do coeficiente de desgaste adimensional K para diversos materiais. O coeficiente de desgaste dos discos, para as três pistas cada uma com um pino, foi calculado utilizando as informações citadas anteriormente (carga aplicada, distância total percorrida no ensaio, dureza do disco, massa específica dos pinos e perda de massa em cada pino). Os valores encontrados são apresentados na Tab. 4.

$$Q = \frac{KW}{H} \quad (2)$$

Onde:

Q: volume de material desgastado por unidade de comprimento [mm³/mm]

K: coeficiente de desgaste adimensional

W: carga aplicada [kgf]

H: dureza Vickers [HV]

Tabela 4. Coeficiente de desgaste para os três pinos utilizados.

Tipo de pino	Coeficiente de desgaste (K)
Revestido com TiN	$3,892 \times 10^{-4}$
Revestido com TiAlN	$4,219 \times 10^{-4}$
Sem revestimento	$5,399 \times 10^{-4}$

Em geral, os valores de K podem variar em mais de cinco ordens de grandeza (10^{-2} a 10^{-7}), sendo considerado um desgaste severo a faixa de valores de 10^{-2} a 10^{-3} e um desgaste suave de 10^{-6} a 10^{-8} . Como esperado, o pino sem revestimento apresentou maior valor de K, pois para uma mesma distância percorrida de deslizamento apresentou maior perda de massa. Além disso, os três pinos apresentaram coeficientes de desgaste com a mesma ordem de grandeza, indicando um desgaste moderado ou intermediário.

3.3. Variação de Massa do Disco e dos Pinos

Na Figura 6(a) pode ser observada a variação de massa para o disco, onde se nota que a maior perda de massa foi registrada quando se utilizou pino de metal duro sem revestimento. Já a menor perda de massa para o disco foi observada no teste com pino revestido por TiN. Já para os pinos, vide Fig. 6(b), a variação de massa foi próxima da resolução da balança, não sendo possível, portanto, afirmar que houve diferença.

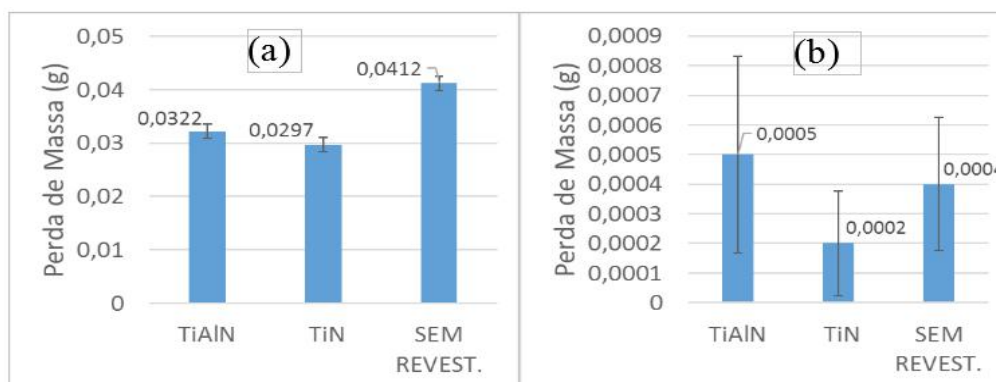


Figura 6. Perda de massa: (a) discos (b) pinos.

3.4. Desgaste dos Discos e Pinos

As pistas de desgaste no disco de aço ABNT 4340 podem ser observadas na Fig. 7. A largura do canal para o pino sem revestimento foi maior (C), comparado com os pinos revestidos. Esta afirmação é justificada pelo fato de que o pino sem revestimento apresentou o maior valor de coeficiente de desgaste adimensional, conforme detalhado anteriormente. As larguras dos canais para os pinos de TiN (B) e TiAlN (A) foram próximas.

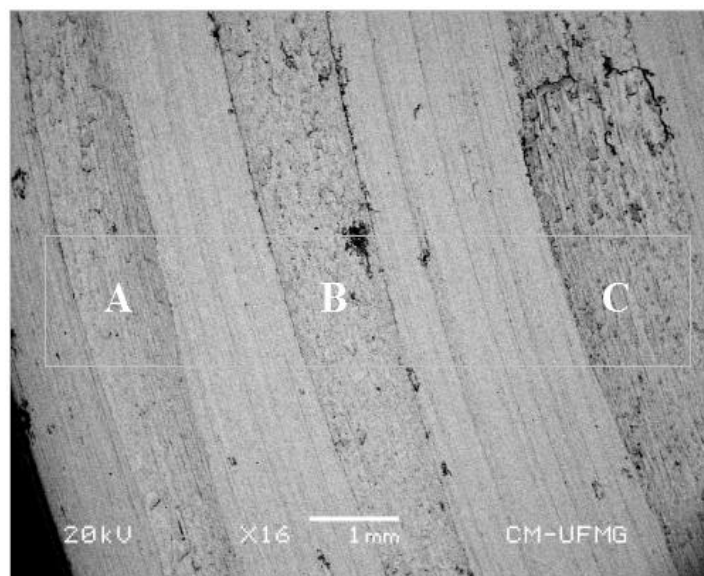


Figura 7. Disco de aço ABNT 4340 desgastado.

Por meio da Figura 8, pode-se observar que em nenhum dos três canais houve adesão dos materiais dos pinos no aço ABNT 4340, o que é confirmado pelo gráfico de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Por outro lado, pode ser observada a presença de sulcos, indicando que houve desgaste abrasivo em todos os canais. Conforme Bharat (2013), o desgaste abrasivo ocorre quando as asperezas de uma superfície dura ou rugosa ou partículas duras deslizam contra uma superfície macia e danifica a interface por deformação plástica ou fratura. Uma característica deste mecanismo de desgaste é a presença de ranhuras e sulcos na superfície. Um outro importante fenômeno observado foi a presença de partículas destacadas do aço ABNT 4340 e que posteriormente foram aderidas novamente à pista, sofrendo deformação. Esta situação ficou mais evidente na pista que sofreu deslizamento do pino revestido com TiN.

Por meio das Figuras 9, 10 e 11 pode-se observar que houve adesão do aço ABNT 4340 nas superfícies dos três pinos utilizados, o que é comprovado pelos resultados de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). O desgaste adesivo ocorre quando há remoção de material de uma superfície sólida em contato com outra, de forma que ocorra transferência de material de uma superfície para outra (Budinski, 2014). A análise EDS também comprovou que mesmo após o deslizamento dos pinos contra o aço ABNT 4340, os revestimentos de TiN e TiAlN continuaram aderidos aos pinos.

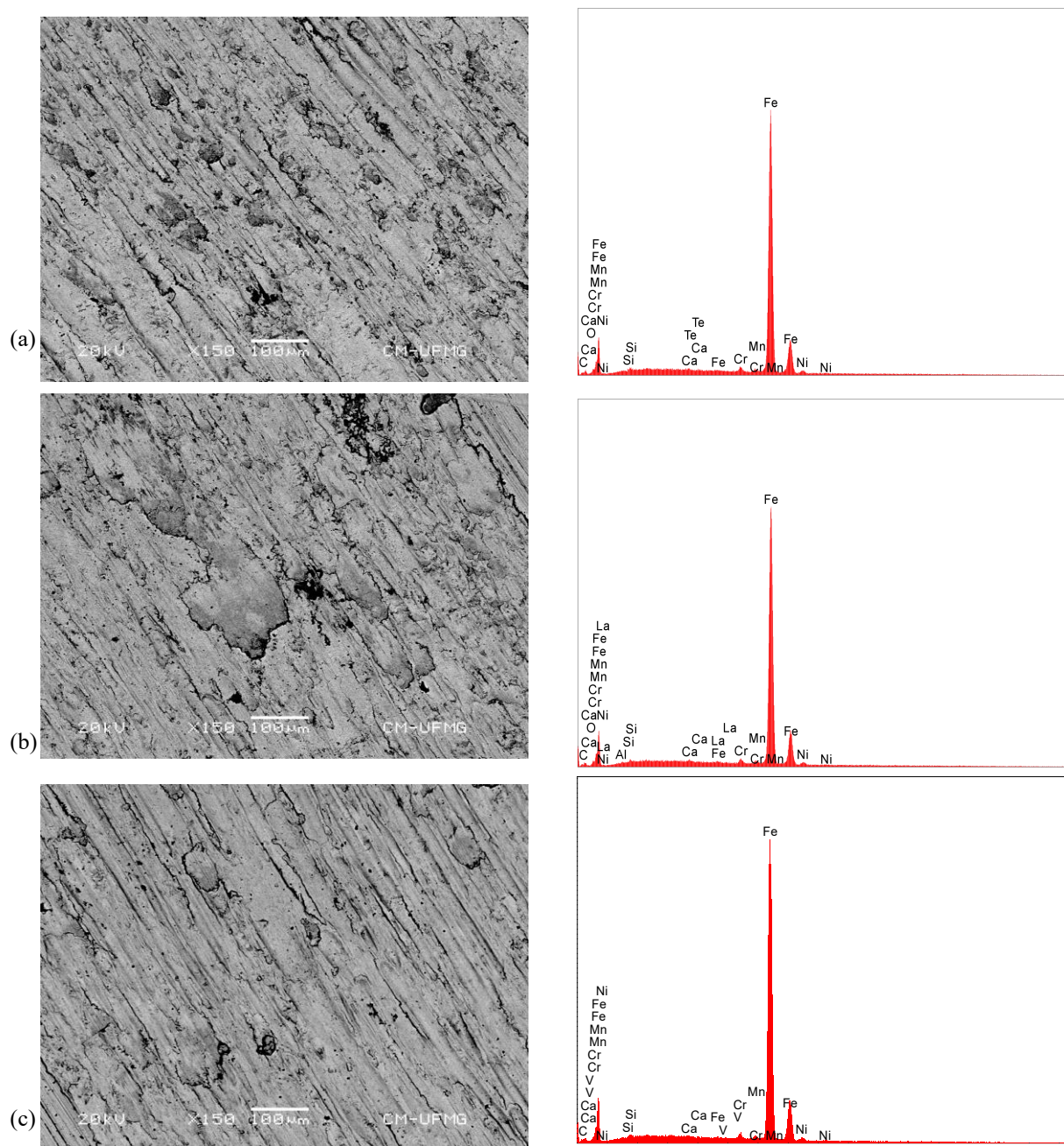


Figura 8. Imagens de MEV e EDS dos canais produzidos por pinos: (a) sem revestimento, (b) com revestimento de TiN e (c) com revestimento de TiAlN.

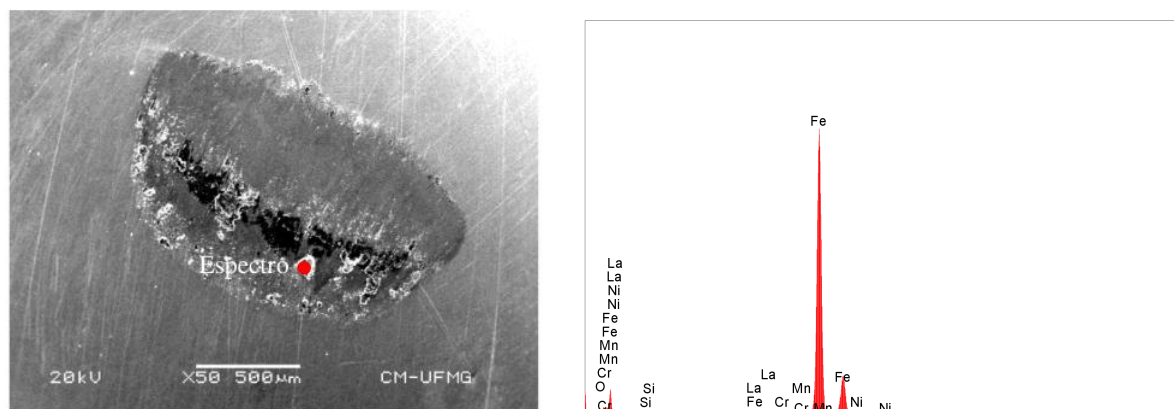


Figura 9. Imagens de MEV e EDS da região de desgaste nos pinos sem revestimento

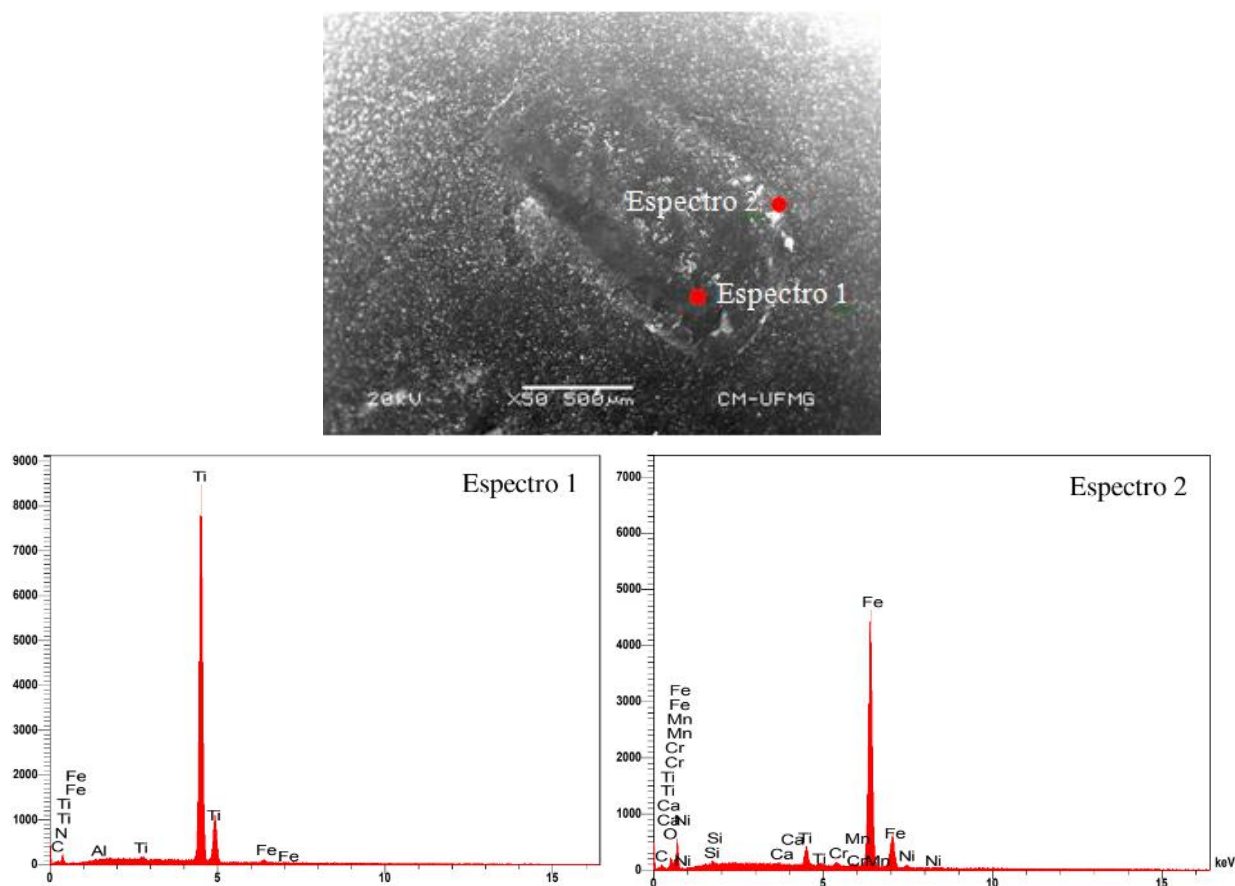


Figura 10. Imagens de MEV e EDS da região de desgaste nos pinos com revestimento de TiN

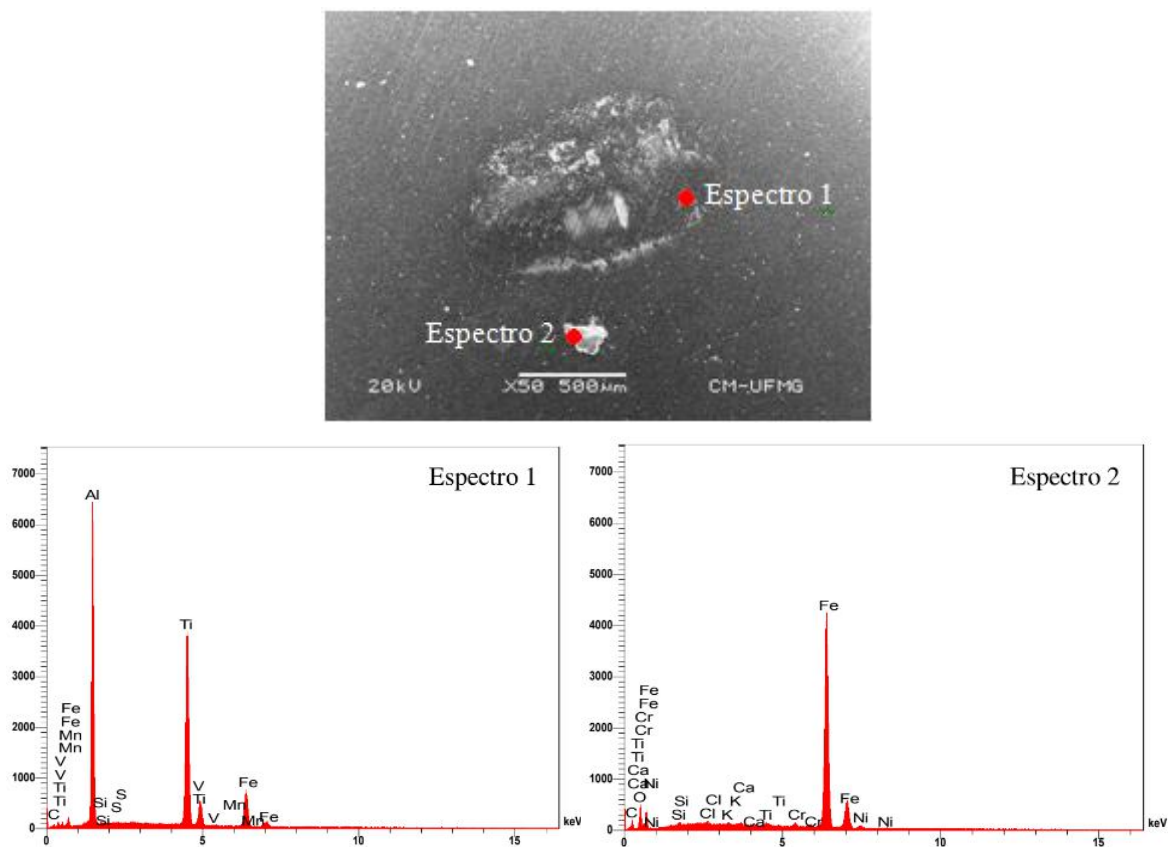


Figura 11. Imagens de MEV e EDS da região de desgaste nos pinos com revestimento de TiAlN.

4. CONCLUSÕES

Após a realização de ensaios de pino sobre disco nos quais pinos de metal duro sem revestimento e revestidos com TiN e TiAlN deslizaram contra discos de aço ABNT 4340, pode-se concluir que:

- A utilização de revestimentos de TiN e TiAlN é capaz de interferir no comportamento de duas superfícies em contato, alterando tanto os valores de coeficiente de atrito quando de desgaste;
- O menor desgaste (perda de massa) nem sempre está ligado à condição de menor coeficiente de atrito. O coeficiente de atrito para o TiAlN foi maior, mas a perda de massa do disco de aço ABNT 4340 e, consequentemente, a espessura da pista foram intermediárias;
- Os coeficientes de desgaste indicaram um desgaste moderado para todas as condições testadas;
- O pino sem revestimento foi o que sofreu maior desgaste e, por isso, provocou uma pista de largura maior no disco;
- Para o disco de aço ABNT 4340 notou-se que a abrasão foi o mecanismo de desgaste predominante;
- Com relação aos pinos, o mecanismo de desgaste observado foi a adesão.

5. REFERÊNCIAS

- ASM international., 1997, “Materials Selection and Design”, In: ASM Handbook. EUA, ASM International, v. 20.
- Hutchings, I. M., 1992, “Tribology: friction and wear of engineering materials”, Ed. Edward Arnold, London .
- König, W.; Klocke, F., 1997, “Fertigungsverfahren 1”, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Mang, T.; Bobzin, K.; Bartels, T., 2011, “Industrial Tribology – Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication”, Ed. WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Germany.
- Mattox, D. M., 1998, “Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing”, Westwood, New Jersey, U.S.A., Noyes Publications.
- Mellor, B. G., 2006, “Surface Coatings for Protection Against Wear.” New York, CRC Press.
- Oelikon Balzers, 2018, “Especificações Balinit A”. Disponível em: <<https://www.oerlikon.com/balzers/br/pt-br/portfolio/solucoes-de-superficie-balzers/revestimentos-a-base-de-pvd-e-pacvd/balinit/a-base-de-tin/balinit-a-1/>>. Acesso em 19 mar. 2018.
- Oelikon Balzers, 2018, “Especificações Balinit Latuma”. Disponível em: <<https://www.oerlikon.com/balzers/br/pt-br/portfolio/solucoes-de-superficie-balzers/revestimentos-a-base-de-pvd-e-pacvd/balinit/a-base-de-tialn/balinit-latuma-1/>>. Acesso em 19 mar. 2018.
- Paldey, S.; Deevi, S. C., 2003, “Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review”, Materials Science and Engineering A342, 58-79.
- Rabinowicz, E., 1995, “Friction and wear of materials”, [s.l.] Wiley.
- Zabala, B. et al., 2017, “Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre: Experimental study and modelling”, Tribology International, v. 106, p. 23–33.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

STUDY ON THE WEAR MECHANISM DURING SLIDING OF UNCOATED AND COATED TUNGSTEN CARBIDE AGAINST NORMALIZED AISI 4340 STEEL

Augusto Moura Martins, augusto.mmartins@yahoo.com.br¹

Bruna Aparecida Rezende, brunarezende12@yahoo.com.br²

Carlos Artur Alevato Leal, carlosleal4@hotmail.com¹

Thiago Meireles Grabe, tmgmeireles@hotmail.com¹

Alexandre Mendes Abrão, abrao@demec.ufmg.br¹

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

Geralda Cristina Godoy, cristinagodoyufmg@gmail.com³

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PPGMEC, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte,

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte,

³Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte

Abstract. Tribology is the branch of science dedicated to the study of friction, wear and lubrication between surfaces in contact. In several processes, such as in machining, the relative movement between the workpiece surface and the cutting tool surface takes place and it becomes of utmost importance the study of wear. One of the materials commonly subject to machining operations is AISI 4340 steel, frequently used in the automotive, aeronautic, naval, building, chemical, and other industries. The aim of the present work is to study the predominant wear mechanisms during pin on disc tests employing uncoated and coated (TiN and TiAlN) tungsten carbide pins against AISI 4340 steel. The tests were performed on the Microtest SMT-A/0100 tribometer and the experimental procedure followed ASTM G99 standard. The results indicated that lower wear rate is not always associated with lower friction coefficient, i.e., the pin coated with TiAlN presented higher friction coefficient and lower mass loss for the AISI 4340 disc. Abrasion was the dominant wear mechanism present in the disc and adhesion was predominant in the pins.

Keywords: *Wear mechanism, carbide, steel ABNT 4340, coefficient of friction, pin on disc test.*