

COMPARATIVO DO DESGASTE EM FRESAS DE METAL DURO COM REVESTIMENTO NA USINAGEM DA LIGA ASTM F75

Ximena Blum Garcia

Luiz Carlos Genuino Gonçalves

Thiago Augusto Da Silva

Amauri Hassui

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

13083-860, Campinas, SP, Brasil

ximenablumg@gmail.com. luiz_genuino@hotmail.com. thiago-fgo@hotmail.com. ahassui@fem.unicamp.br

Resumo. Superligas de cobalto são importantes na indústria biomédica devido à sua resistência ao desgaste e suas propriedades mecânicas, o que permite a fabricação de próteses de joelhos e quadris. O objetivo deste trabalho é comparar os mecanismos de desgaste presentes em fresas de topo de metal duro com diferentes revestimentos, durante uma operação de fresamento tangencial na liga de cobalto cromo baseada na norma ASTM F75. A abordagem metodológica incluiu microscopia óptica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Como resultado desses experimentos, a fresa de topo de metal duro com revestimento nc- AlTiN / a- Si_3N_4 apresentou o melhor desempenho em termos de desgaste de flanco em comparação à ferramenta com revestimento AlTiN , além disso, adesão e abrasão foram os mecanismos de desgaste predominantes. Também observou-se que as ferramentas foram mais sensíveis às avarias do que ao desgaste.

Palavras chave: Fresamento. Cobalto-Cromo. Desgaste. PVD. Fresas de topo.

1. INTRODUÇÃO

As ligas de cobalto são amplamente utilizadas em diferentes setores industriais como automotivo, aeronáutico, petrolífero, marítimo e biomédico, neste último têm sido aplicadas na fabricação de próteses dentárias desde a década de 1930 (BHAT, 2002). Além disso, tendências recentes indicam sua utilização como matéria prima para manufaturar juntas artificiais de joelho e quadril devido a sua resistência ao desgaste, resistência mecânica e resistência à corrosão (MURPHY E BLACK, 2016). Atualmente a demanda de implantes ortopédicos vêm crescendo devido a diferentes fatores, um dos principais é o aumento da expectativa de vida das pessoas, já que o envelhecimento acarreta doenças como artrite e osteoporose. Em adição, a obesidade e a prática de esportes excessiva, situações comuns hoje em dia, requerem mais esforços das articulações deixando-as sujeitas a cargas maiores às esperadas e interferindo no seu tempo de vida. Sendo necessário assim a substituição destas para melhorar a qualidade de vida (IPEREM E ZANDERS, 2018). Em vista disto, é importante que os fabricantes desenvolvam maneiras de produzir próteses em tempos menores, com alto grau de confiabilidade e biocompatibilidade. O que propicia ao campo da usinagem vários desafios, dado que as ligas de Cobalto-Cromo são materiais duros e abrasivos, com alto módulo de elasticidade e uma baixa condutividade térmica, e, portanto, catalogados como materiais difíceis de cortar. Por causa dessas propriedades térmicas e mecânicas, a utilização de fluidos de corte no processo da usinagem destas ligas é outro fator importante, pois embora sejam necessários para garantir a qualidade superficial, há algumas restrições na utilização dos fluidos convencionais porque podem contaminar as próteses (IPEREM E ZANDERS, 2018).

Até hoje os estudos feitos na usinagem desta liga são poucos, no entanto os autores Ahearne et al. (2016), realizaram o fresamento tangencial da liga ASTM F75 empregando fresas de topo de metal duro revestidas, como resultado foi possível identificar um progressivo desgaste de flanco, além de lascamento e quebra da ferramenta. Outros trabalhos no fresamento de ligas de cobalto são dos autores, Aykut et al. (2007); Shokrani, Dhokia, e Newman (2016), que em suas pesquisas verificaram a dificuldade de usar este tipo de materiais na curta vida das ferramentas, devido ao encruamento e a geração de calor. A diferença dos anteriores trabalhos, que foram executados utilizando fluidos de corte, os autores Zaman et al. (2017), usinaram a seco uma liga de Cobalto-Cromo-Molibdênio e observaram desgaste de flanco e micro lascamentos na aresta de corte, também foi evidente a formação da aresta postiça de corte como um dos principais modos de falha, tanto para as ferramentas com cobertura como sem cobertura.

Dessa forma a usinagem deste tipo de liga biomédica é um campo interessante a ser estudado, sobretudo para os fabricantes de próteses, devido ao fato deste material ser utilizado a nível comercial, pois tem propriedades mecânicas melhores quando comparado com os aços inoxidáveis, ligas tradicionalmente usadas nesta área, e custos de fabricação menores quando comparados com os custos de produção de implantes em titânio, especificamente na liga $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$. Logo,

este trabalho visa comparar os diferentes mecanismos de desgaste presentes durante o fresamento tangencial da liga de cobalto cromo baseada na norma ASTM F75 usando duas fresas de topo inteiriças de metal duro, uma com cobertura de AlTiN e a outra com uma cobertura de nc-AlTiN/a-Si₃N₄, considerada mais moderna.

2. METODOLOGIA

Os dados foram obtidos a partir de um processo de fresamento tangencial concordante realizado em corpos de prova com as seguintes dimensões 30,7 mm x 20,3 mm x 245 mm. O material utilizado para os ensaios foi a liga ASTM F75. A composição química desta liga é detalhada na Tab. 1.

Tabela 1. Composição química da liga ASTM F75 % em massa (ASTM, 2015)

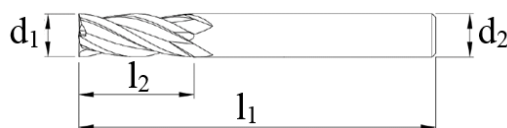
Elemento	Cr	Mo	Ni	Fe	C	Si	Mn	W	P	S	N	Al	Ti	Bo	Co*
Min	27,0	5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	balanço
Max	30,0	7,0	0,50	0,75	0,35	1,0	1,0	0,2	0,02	0,01	0,25	0,1	0,1	0,01	balanço

* Aproximadamente igual à diferença do 100% da soma da percentagem dos outros elementos especificados.

Para os ensaios foram utilizadas fresas de topo de metal duro, ERDC.100.R4-A100-22-72-ST classe K40, da empresa CediFER, com dois tipos de revestimento diferentes, a saber AlTiN e nc-AlTiN-a-Si₃N₄ ambas PVD, as ferramentas foram revestidas pela empresa Platit do Brasil. As características geométricas das fresas são mostradas na Tab. 2.

Tabela 2. Geometria e dimensões das fresas (CediFER, 2015)

d ₁	d ₂	l ₁	l ₂	Z	Raio aresta	Ângulo radial	Ângulo axial
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[dentes]	[μm]	[°]	[°]
10	10	72	22	4	< 5	0	30



Em relação às coberturas empregadas nos ensaios, a estrutura cristalina do revestimento AlTiN é composta por cristais relativamente grandes em função da forma de deposição do revestimento e devido à sua estequiometria. Enquanto o revestimento nc-AlTiN / a-Si₃N₄ é composto por cristais de dimensões nanométricas, sendo assim sua estrutura cristalina extremamente refinada, o que confere ao revestimento maior dureza e menor tensão residual. Assim, os pequenos cristais de AlTiN ficam inseridos numa matriz amorfa de Si₃N₄, na qual a inclusão do silício melhora a capacidade refratária do revestimento, aumenta a dureza e diminui a tensão residual do revestimento, melhorando sua adesão ao substrato. As características físicas das coberturas empregadas durante os ensaios são apresentadas na Tab. 3.

Tabela 3. Características físicas das coberturas utilizadas (PLATIT, 2017a, 2017b)

Cobertura	Cor	Dureza	Espessura	Temperatura oxidação
		[GPa]	[μm]	[°C]
AlTiN	Cinza	36	3	700
nc-AlTiN/a-Si ₃ N ₄	Cobre	41	3	1200

Os ensaios foram executados num centro de usinagem Hartford modelo 1000 de três eixos. Essa máquina-ferramenta tem 7,5 kW de potência, uma rotação máxima de 12.000 RPM e está equipada com o comando CNC Mitsubishi Hartrol M7200. Para os experimentos se utilizou lubrificação convencional. O fluido de corte utilizado foi o Bondman oil 30, um produto sintético para uso geral em operações de usinagem com propriedades refrigerantes e lubrificantes.

O desgaste das fresas foi avaliado com auxílio de microscopia óptica utilizando um microscópio digital U500X, calibrado utilizando o padrão próprio do microscópio, e o processamento das imagens obtidas e a medição dos desgastes foi realizado utilizando o software ImageJ2. Para a análise dos mecanismos de desgaste presentes, foi realizada uma microscopia eletrônica de varredura em um microscópio da marca Zeiss modelo EVO MA15, pertencente ao Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

O planejamento experimental consistiu na variação de um único fator, a cobertura da ferramenta de metal duro, em dois níveis. Os demais parâmetros de corte foram mantidos constantes e adotou-se como critério de fim de vida da ferramenta o desgaste de flanco médio V_B=0,2 mm. Os parâmetros de corte utilizados durante os testes são mostrados na Tab. 4.

Tabela 4. Parâmetros de corte

Parâmetro			
Velocidade de corte	v_c	[m/min]	60,0
Avanço por dente	f_z	[mm/dente]	0,05
Profundidade de usinagem	a_p	[mm]	2,0
Penetração de trabalho	a_e	[mm]	0,5

Para a seleção destes parâmetros de corte foi realizada uma pesquisa na literatura e consideradas recomendações do fabricante da ferramenta. A velocidade de corte de 60 m/min é considerada agressiva quando comparada com os valores que atualmente aplicam as empresas que fabricam próteses, que são próximos de 40 m/min. Contudo optou-se por sua utilização para avaliar o que ocorreria, dado que o revestimento nc-ALTiN/a-Si₃N₄ é novo e havia uma expectativa de que sua utilização aumentaria a vida da ferramenta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desgaste da ferramenta com cobertura de ALTiN começou a ser evidente depois de 9.000 mm³ de material removido, a partir desse ponto foram mensuradas as variações de desgaste e analisados os mecanismos de desgaste presentes. Além disto, esta ferramenta atingiu o V_B de 0,2 mm quando o volume de cavaco retirado foi igual a 15.000 mm³, por isso os testes nas duas ferramentas limitaram-se a esse volume. Os dados resultantes estão representados na Fig. 1.

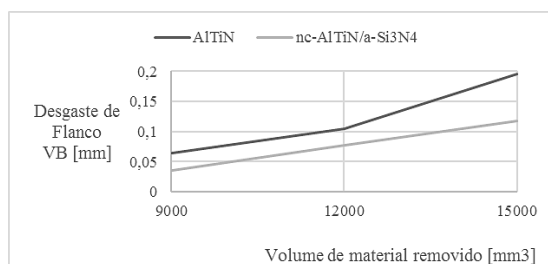


Figura 1. Resultados da vida da ferramenta

Observou-se que a ferramenta com cobertura de nc-ALTiN/a-Si₃N₄ apresentou melhor desempenho em termos de desgaste de flanco em comparação com a ferramenta com cobertura de ALTiN, pois para o mesmo valor de volume de cavaco removido, o valor do desgaste sempre é menor. Na Fig. 1 é possível observar que a curva com os valores para a ferramenta com cobertura de nc-ALTiN/a-Si₃N₄ tem uma tendência de crescimento do desgaste constante, enquanto os valores para a cobertura de ALTiN mostram uma forte mudança do coeficiente angular depois de alcançar os 12.000 mm³ de cavaco removido. Astakhov e Davim (2008) expõem que quando são traçadas as curvas de desgaste de flanco em relação ao tempo de corte ou o volume de material removido, são identificadas três regiões distintas. A primeira se caracteriza por apresentar uma taxa de desgaste relativamente alta. A segunda região da curva exibe uma zona estável que é considerada a região de operação normal da ferramenta de corte. Finalmente, na terceira região ou do desgaste acelerado, o corte é realizado com forças de corte e temperaturas altas, além da presença de vibrações. Desta forma, a partir dos dados recolhidos é possível afirmar que para a ferramenta de ALTiN se alcançou o valor do V_B crítico, no qual ocorre a transição da zona de corte estável para a zona de desgaste acelerado, enquanto a ferramenta com cobertura de nc-ALTiN/a-Si₃N₄ continua na região de corte estável. Logo, assume-se que as duas ferramentas atravessaram pela primeira faixa de ajuste já que não foram tomados dados suficientes para construir a curva do desgaste completa.

Ao comparar o estado das fresas ao longo do ensaio, a fresa com cobertura de ALTiN na primeira avaliação (9.000 mm³) mostrou na ponta uma ligeira afetação da superfície de saída, já para os 12.000 mm³ de material removido a ponta da fresa apresentou lascamento e na última verificação (15.000 mm³) foi visível a presença de deformação plástica da aresta de corte e um lascamento não uniforme, além do aparente deslocamento da cobertura da ferramenta. Do mesmo modo, para a fresa com cobertura de nc-ALTiN/a-Si₃N₄, nota-se a presença de desgaste de flanco de forma uniforme no comprimento da aresta cortante e na superfície de saída foi observada uma aparente deformação plástica da aresta de corte. As duas coberturas apresentaram desgaste de flanco, causado por ação do mecanismo de abrasão mecânica, que ocorre devido às altas pressões com que se dá o movimento relativo entre a ferramenta e a peça. Este tipo de desgaste é visível na superfície de folga, por sofrer forte atrito com a peça que é um elemento rígido. Outro mecanismo de desgaste observado foi o fenômeno de adesão, este se manifesta na superfície de folga e na superfície de saída da ferramenta ocasionado como consequência do contato entre peça-ferramenta ou entre cavaco-ferramenta, que faz com que seja formada uma fusão parcial entre as duas superfícies. À medida que a operação de usinagem continua estas duas superfícies tendem a se separar e assim as partículas das superfícies se deslocam de uma para a outra. A aparência de uma superfície que tenha sofrido este tipo de desgaste é áspera (DINIZ, MARCONDES, E COPPINI, 2014).

A superfície de folga e a superfície de saída das duas ferramentas são mostradas na Fig. 2 em (a) para a ferramenta com cobertura de AlTiN e em (c) para a fresa com cobertura de nc-AlTiN/a-Si₃N₄.

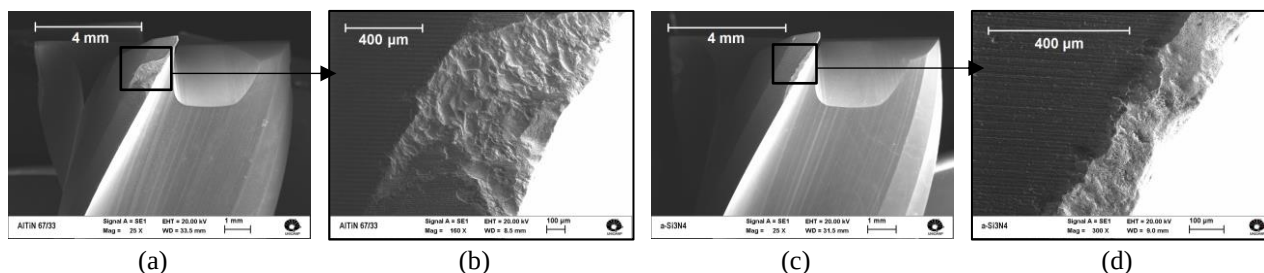


Figura 2. MEV ferramentas. (a) Fresa cobertura AlTiN, mag. 25X. (b) Superfície de folga fresa cobertura AlTiN, mag. 160X. (c) Fresa cobertura de nc-AlTiN/a-Si₃N₄, mag. 25X. (d) Superfície de folga fresa cobertura nc-AlTiN/a-Si₃N₄, mag. 300X

Com a realização da microscopia eletrônica de varredura e a espectroscopia de energia dispersiva esclareceu-se que a adesão ocorreu predominantemente na superfície de folga das ferramentas onde foram encontradas partículas de cromo, cobalto e molibdênio que são os principais elementos que formam a liga ASTM F75. Já na superfície de saída também foram encontradas partículas de cobalto e cromo, porém estes dois elementos podem ser encontrados tanto no material da peça como da ferramenta, também foi possível observar-se tungstênio que só pode ser do substrato da ferramenta. Os demais elementos encontrados durante a espectroscopia de energia dispersiva obedecem aos componentes das coberturas como o alumínio, o titânio, o silício e o nitrogênio. As áreas das superfícies de folga analisadas são mostradas na Fig. 2 (b) e (d).

A análise da fresa com cobertura de AlTiN mostrou que em vários pontos a ferramenta já não tinha mais a cobertura e, portanto, os elementos reconhecidos eram somente os do metal duro, isto aconteceu porque no final da vida, a ferramenta sofreu deslocamento da cobertura na superfície de folga. Por outro lado, no teste da fresa com cobertura de nc-AlTiN/a-Si₃N₄, os resultados expõem que entre os componentes da cobertura já não tinham mais partículas de AlTiN, ou seja, da cobertura só restou a matriz de silício, isto explica de certo modo as propriedades superiores desta cobertura em termos de tenacidade e resistência à oxidação.

Durante os ensaios foram mais perceptíveis as avarias do que o desgaste, assim, a ferramenta com cobertura de AlTiN mostrou lascamento na ponta da ferramenta e aparentemente em parte do comprimento de corte. Esta avaria afeta o acabamento das peças e pode causar quebra da aresta cortante, este tipo de avaria acontece principalmente devido ao uso de ferramentas de material frágil ou com arestas de corte pouco reforçadas, para este caso a situação está mais inclinada para a geometria da aresta. Já na fresa com cobertura de nc-AlTiN/a-Si₃N₄ a avaria que foi mais evidente durante a usinagem, foi a presença de deformação plástica da aresta de corte, gerada principalmente por efeito das altas temperaturas nesta zona de corte, somadas com a alta pressão aplicadas na região. Considerando as propriedades mecânicas e físicas desta cobertura, uma possível melhoria desta situação tem a ver mais com a mudança dos parâmetros de corte utilizados durante a operação.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que os mecanismos de desgaste predominantes foram abrasão e adesão.

A análise dos dados coletados permite afirmar que a cobertura de nc-AlTiN/a-Si₃N₄ mostrou desempenho superior quando comparado ao revestimento de AlTiN, em relação ao desgaste de flanco.

As avarias observadas durante os testes foram lascamento e deslocamento da cobertura para a ferramenta com cobertura de AlTiN e deformação plástica da aresta de corte tanto para a fresa com cobertura de AlTiN como da fresa com cobertura de nc-AlTiN/a-Si₃N₄.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), bolsa de estudos processo N° 1802728, e das empresas Platit e GC Tools Indústria e Comércio de Ferramentas LTDA.

6. REFERÊNCIAS

Ahearne, E., Baron, S., Keaveney, S., Dowling, D. P. e Byrne, G., 2016. "Tool Wear in Milling of Medical Grade Cobalt Chromium Alloy - Requirements for Advanced Process Monitoring and Data Analytics." Em *Proceedings The*

- Machine Tool Technologies Research Foundation (MTTRF) and iAM-CNC Annual Meeting 2016*. San Francisco, California, USA.
- Astakhov, V. P. e Davim, J. P., 2008. "Tools (Geometry and Material) and Tool Wear". *Machining*. Vol. 39, p. 29–57 London: Springer London.
- ASTM, 2015. *Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Castings and Casting Alloy for Surgical Implants (UNS R30075)*¹.
- Aykut, S., Bagci, E., Kentli, A. e Yazıcıoğlu, O. 2007. "Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool". *Materials and Design*. Vol. 28(6), p.1880–1888.
- Bhat, S. V., 2002. *Biomaterials*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- CediFER, 2015. "ROTATIVAS MD, Família: ERDC - Maxi-Mill Downcut ERDC". 29 Mai. 2019 <http://www.cedifer.com.br/cat_detalhes_Produto_det.asp?id_produto=12031&tipo=5>.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L., 2014. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber Editora, São Paulo, 9º ed.
- Iperem, Jan-Willem e Ruud Zanders. 2018. "Novas estratégias para usar componentes ortopédicos - Usinagem Brasil". 22 Out. 2018 <<http://www.usinagem-brasil.com.br/13405-novas-estrategias-para-usinar-componentes-ortopedicos/pa-1/>>.
- Murphy, W. e Black, J., 2016. *Handbook of Biomaterial Properties*. W. Murphy, J. Black, and G. Hastings. New York, 2ª edição.
- PLATIT. 2017a. "nACo". 3 Jun. 2019 <<https://www.platit.com/en/coatings/nacor>>.
- PLATIT. 2017b. "TiAlN/AlTiN". 3 Jun. de 2019 <<https://www.platit.com/en/coatings/tialn-altin>>.
- Shokrani, A., Dhokia, V. e Newman, S. T., 2016. "Cryogenic High Speed Machining of Cobalt Chromium Alloy". Em *7th HPC 2016 - CIRP Conference on High Performance Cutting*. Vol. 46, p. 404–407.
- Zaman, H. A., Sharif, S., Hasbullah, M. e Kurniawam, D., 2017. "Effect of High Speed End Milling of Co-28Cr-6Mo Cobalt Chromium Molybdenum Alloy using Uncoated and Coated Carbide Tools". *Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 12(4), p. 945–949.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Wear Comparison Between Coated Carbide Endmills During the Machining of ASTM F75 Alloy

Ximena Blum Garcia

Luiz Carlos Genuino Gonçalves

Thiago Augusto Da Silva

Amauri Hassui

School of Mechanical Engineering

University of Campinas - UNICAMP

13083-860, Campinas, SP, Brazil

ximenablumg@gmail.com. luiz_genuino@hotmail.com. thiago-fgo@hotmail.com. ahassui@fem.unicamp.br

Abstract. Cobalt super alloys are important in the biomedical industry because of its wear resistance and their mechanical properties that let prostheses fabrication which are used in areas like knees and hips. The aim of this paper is to compare wear mechanisms present in endmilling tools with different coatings, during an operation of peripheral milling in the ASTM F75 alloy. The methodological approach included optical microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectrometry (EDS). As a result of these experiments, the endmilling tool with nc-ALTiN/a-Si₃N₄ coating had the best performance in terms of flank wear compared to the tool with ALTiN coating, in addition, adhesion and abrasion were the prevailing wear mechanisms. Tests showed tools were more sensitive to damage than wear.

Keywords: milling, ASTM F75, cobalt-chromium, wear, endmills

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.