

AUMENTANDO A PRODUTIVIDADE NO TORNEAMENTO DA LIGA Ti-6Al-4V COM ACESSO À HSM POR MEIO DA TÉCNICA DE APLICAÇÃO DE FLUIDO À ALTA PRESSÃO

Rosemar Batista Da Silva

Álison Rocha Machado

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2.121, Uberlândia – MG, 38.408-100, Brasil.

E-mail: alisonm@mecanica.ufu.br

Emmanuel O. Ezugwu

John Bonney

London South Bank University, Machining Research Centre, Faculty of Engineering, Science and the Built Environment, 103 Borough Road, Londres, SE1 0AA, Inglaterra, Reino Unido.

Resumo: A usinagem das ligas de titânio têm sido sempre motivo de vários estudos e pesquisas uma vez que este material apresenta peculiaridades que os caracterizam como sendo de baixa usinabilidade. Ligas de titânio são normalmente usinadas a relativas baixas velocidades de corte devido ao acelerado desgaste das ferramentas de corte. Este trabalho mostra que é possível aumentar a produtividade na operação de torneamento de acabamento da liga de titânio Ti-6Al-4V (IMI 318), em termos de aumento da vida de ferramenta, a altas velocidades de corte (HSM) quando se aplica fluidos de corte à alta pressão (HPC – High Pressure Coolant). Foram utilizadas ferramentas de metal duro revestidas (classe K-10), geralmente as mais recomendadas para a usinagem de titânio. Foram monitorados a vida das ferramentas de corte e a rugosidade das superfícies usinadas para avaliar a eficiência da técnica HPC. Foram empregadas as seguintes condições de corte: velocidades de corte de 110, 120 e 130 m min⁻¹, avanço de 0,15 mm rot⁻¹ e profundidade de corte constante de 0,5 mm. Foi utilizado um sistema de aplicação de fluido de corte à pressão de 11 MPa (110 bar). Testes de usinagem utilizando o sistema de aplicação de fluido convencional (sobre-cabeça) também foram realizados para permitir comparações. Além de prolongar a vida das ferramentas, a técnica HPC produziu valores de rugosidade da superfície aceitáveis e ligeiramente superiores aos produzidos por meio da técnica convencional.

Palavras-chave: usinagem de titânio, fluido de corte à alta pressão, vida de ferramenta, HSM, metal duro.

1. INTRODUÇÃO

Crescente interesse de pesquisadores e cientistas dos setores acadêmico e industrial, principalmente os da área aeroespacial, tem sido demonstrado à usinagem das ligas de titânio. Estas ligas são principalmente utilizadas na produção de componentes de turbinas, tais como eixos, discos e palhetas e na fuselagem de aviões. As ligas de titânio possuem excelente relação resistência-peso, elevada resistência mecânica que é mantida a altas temperaturas e excelente resistência à corrosão e por isso são adequadas para trabalhar em ambientes onde as temperaturas podem variar desde abaixo de 0°C a 600°C (Mantle and Aspinwall, 1998). A liga à base de titânio Ti-6Al-4V tem aplicações na indústria aeroespacial, em especial aeronáutica, nas indústrias biomédica, química, naval e petroquímica. Em contra-partida às ótimas propriedades apresentadas pelas ligas de titânio citadas anteriormente, estas ligas apresentam problemas durante a usinagem e por isso são

consideradas materiais de difícil corte. Os problemas mais frequentes são a tendência de reagir quimicamente com maioria dos materiais de ferramentas de corte a temperaturas superiores a 500°C, formação de cavacos segmentados, grande tendência de encruamento durante a usinagem, baixo módulo de elasticidade e baixa condutividade térmica comparada ao Inconel 718 e aço AISI 1045. A reduzida área de contato cavaco-ferramenta, o desenvolvimento de elevadas temperaturas de corte, elevadas tensões na ponta da ferramenta e de elevadas forças durante a usinagem das ligas de titânio promovem a deformação plástica e/ou aceleram o desgaste da ferramenta (Ezugwu and Wang, 1997). Diante deste cenário as velocidades de corte têm que ser reduzidas. Em alguns casos as ferramentas de corte apresentam lascamento e/ou fratura súbita devido à tendência do titânio soldar-se à ponta da ferramenta.

Apesar de todas as peculiaridades e dificuldades encontradas na usinagem de titânio, o aumento da produtividade sem comprometimento da qualidade da peça usinada é sempre desejado. Para isso é necessário aumentar as velocidades de corte ou taxa de remoção de material. Desta forma a ferramenta de corte para usinar as ligas de titânio, em especial a liga Ti-6Al-4V (IMI 318), a elevadas velocidades de corte (HSM) deve possuir propriedades adicionais que venham satisfazer aos requisitos de resistência a elevadas temperaturas de corte, elevadas tensões, baixa tendência de reagir quimicamente, com baixa taxa de desgaste. A correta escolha da atmosfera de usinagem bem como as condições de corte compatíveis com a operação em questão são fatores que devem ser levados em conta.

Embora não exista um conceito padrão para o termo “usinagem à alta velocidade” (HSM ou HSC), uma vez que este irá depender do material a ser usinado, ferramenta de corte e operação, define-se tecnicamente usinagem à alta velocidade para um determinado material como sendo aquela acima da qual o cisalhamento termoplástico adiabático desenvolve-se completamente na zona de cisalhamento primário (Metals Handbook, 1989). A usinagem à alta velocidade dependerá, também, do material da ferramenta que deverá suportar temperaturas de corte mais altas. Considera-se na prática que a faixa de alta velocidade de corte inicia-se a cerca de três vezes a velocidade de corte convencional. Em operação de fresamento de ligas de titânio à alta velocidade de corte utilizam velocidades que variam entre 100 e 400 m min⁻¹ (Aspinwall et al, 2003). Em operações de torneamento convencional as velocidades de corte normalmente não ultrapassam 60 m min⁻¹, utilizando ferramentas de metal duro, embora há registros de alguns trabalhos utilizando estas ferramentas com velocidades de corte a 80 m min⁻¹ na operação de torneamento da liga de Ti-6Al-4V, com valores vida de ferramenta satisfatórios (SECO, 2002; Vigneau, 1997; Ezugwu et al, 2004a; Ezugwu et al, 2004b; Machado et al, 2004 e Magalhães e Ferreira, 2004).

O uso de aplicação de fluido de corte à alta pressão não é novidade no mundo científico e industrial. Usinagem assistida com jato à alta pressão ou técnica de aplicação de fluido à alta pressão (traduzido do Inglês “HPC – High Pressure Coolant”) é a denominação mais utilizada. Considera-se aplicação de fluido à alta pressão quando as pressões de aplicação estão dentro da faixa de 0,5 e 30 MPa (5-300 bar) (SECO, 2002). A pressão de aplicação de fluido de corte convencional geralmente é de 0,3 MPa (3 bar). Em geral os estudos sobre HPC realizados no passado (Pigott et al, 1952; Field, 1968, Sharma et al, 1971 e Kishi et al, 1975) e outros mais recentes (Vigneau, 1997; Mazurkiewicz et al, 1989; Machado, 1990; Lindeke et al, 1991a; Wertheim et al, 1992; Kaminski et al, 1999; Dahlman, 2000, Klocke et al, 2002 e Machado et al, 2004) apresentaram vários benefícios comparado à técnica convencional de aplicação de fluido de corte. Dentre eles podem ser citados o aumento de até 5 vezes na vida das ferramentas, forças de corte mais baixas, redução da temperatura na região de corte e componentes usinados com melhor integridade superficial e dimensões mais exatas, e produção de cavacos fragmentados que diminuem os riscos de acidentes com a manutenção dos mesmos e deixam a área de corte mais limpa. No processo de aplicação de fluido à alta pressão, o jato do fluido de corte é normalmente direcionado até a região onde o cavaco perde contato com a ferramenta, entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco. Uma cunha hidráulica é criada na interface peça-ferramenta a qual garante uma penetração mais efetiva do jato na região de corte e assim melhorando as funções refrigerante-lubrificante do fluido de corte. Uma força resultante é gerada a partir da cunha

hidráulica que então atua sobre o cavaco. Esta força resultante que está relacionada com o valor da pressão de aplicação, com a forma e a distribuição da pressão sobre o cavaco, provoca a redução da área de contato cavaco-ferramenta e determina a direção de saída do cavaco. Devido ao menor contato cavaco-ferramenta, a ferramenta torna-se menos susceptível ao desgaste causado pela reação química entre a ferramenta e os cavacos sendo formados, especialmente os cavacos de titânio (Lindeke et al, 1991b). Além disso, o gradiente de temperatura é reduzido pela penetração do jato com alta energia dentro da interface cavaco-ferramenta e, conseqüentemente, produzindo uma lubrificação adequada na interface cavaco-ferramenta com significativa redução do atrito nesta interface (Ezugwu et al, 2003) e também com redução da zona de aderência (Mazurkiewicz et al, 1989). Como o processo é contínuo, a elevada velocidade do fluxo do fluido causa a quebra do cavaco em vários fragmentos pequenos. Tem-se registro na literatura de aumentos de até 3 vezes na velocidade de corte quando pressões de aplicação de fluido superiores a 20 MPa são empregadas no torneamento de ligas de titânio, utilizando ferramentas de metal duro sem revestimento, comparado à técnica de aplicação de fluido convencional (SECO, 2002 e Machado et al, 2004). Dentro deste contexto, aumentar a pressão de aplicação do fluido de corte pode ser uma alternativa para melhorar a usinabilidade das ligas de titânio, com aumento de produtividade, uma vez que o acesso a equipamentos modernos e mais potentes permite utilizar pressões de aplicação de fluidos de corte bem superiores aos utilizados no passado.

Este trabalho mostra que a técnica de aplicação de fluido à alta pressão (HPC) possibilita prolongar a vida da ferramenta com valores de rugosidade de superfície aceitáveis e, conseqüentemente, aumentar a produtividade na operação de torneamento da liga Ti-6Al-4V a altas velocidades de corte (HSM). Detalhes do equipamento e das ferramentas de corte são destacados.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material da peça utilizado foi a liga de titânio do grupo alfa-beta Ti-6Al-4V (IMI 318) no estado homogeneizado e recozido em formas de barras cilíndricas com diâmetro e comprimento de 300 mm. A composição química e as propriedades físicas do material da peça são mostradas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1: Composição química da liga Ti-6Al-4V (% em peso).

	Elemento químico								
	Al	V	Fe	O	C	H	N	Y	Ti
Mínimo	5,50	3,50	0,30	0,14	0,08	0,01	0,03	50 ppm	Balanco
Máximo	6,75	4,50		0,23					

Tabela 2: Propriedades físicas da liga Ti-6Al-4V.

Resistência à tração (MPa)	0,2% Resistência à tensão (MPa)	Coeficiente de alongamento (%)	Densidade (g cm ⁻³)	Ponto de fusão (°C)	Condutividade térmica a 20°C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Dureza (I.C. – 99%)* HV ₁₀₀
900-1160	830	8	4,50	1650	6,6	Min. = 341 Máx. = 363

*Intervalo de Confiança (para uma probabilidade de 99%) para todas as medições.

Os ensaios foram realizados em um torno equipado com comando numérico computadorizado (CNC), modelo Colchester Electronic MASTIFF, 11kW de potência e com variação de velocidade e avanço entre 16-18000 rpm e 0,01-5 mm rot⁻¹, respectivamente (Figura 2 (a)). A unidade de armazenamento e bombeamento de fluido à alta pressão (Figura 2 (b) e (c)) denominada

Chipblaster – CV26-3000, é montada separadamente e tem painel de funcionamento independente do torno. A potência máxima de funcionamento do *Chipblaster* é de 22,3 kW, o tanque tem capacidade para armazenar até 454 litros e bombear o fluido de corte à pressão e vazão máximas de 21 MPa (210 bar) e 197 l min⁻¹, respectivamente. O fluido de corte é bombeado através mangueiras que são conectadas com o interior do torno pela parte traseira da máquina. Ele é inicialmente filtrado nos cilindros A e B (Figura 2 (c)), e em seguida bombeado até a torre com porta-ferramenta (Figura 2 (d)) através do qual é, finalmente, aplicado em forma de jato sobre região de corte entre a superfície da peça e superfície de saída da ferramenta. O fluido de corte (HOCUT 3380) utilizado nos ensaios é do tipo mineral e emulsionável com propriedades antiespumantes. É aplicado a uma concentração de 6% e é recomendado para sistemas de aplicação de fluido à alta pressão. O diâmetro do orifício de saída do jato de fluido de corte à alta pressão é de 2,0 mm e está a 13,5 mm de distância da ponta da ferramenta. Na técnica convencional o diâmetro do orifício do bocal é de 6 mm e a distância percorrida pelo jato até a a ponta da ferramenta é de 100 mm.

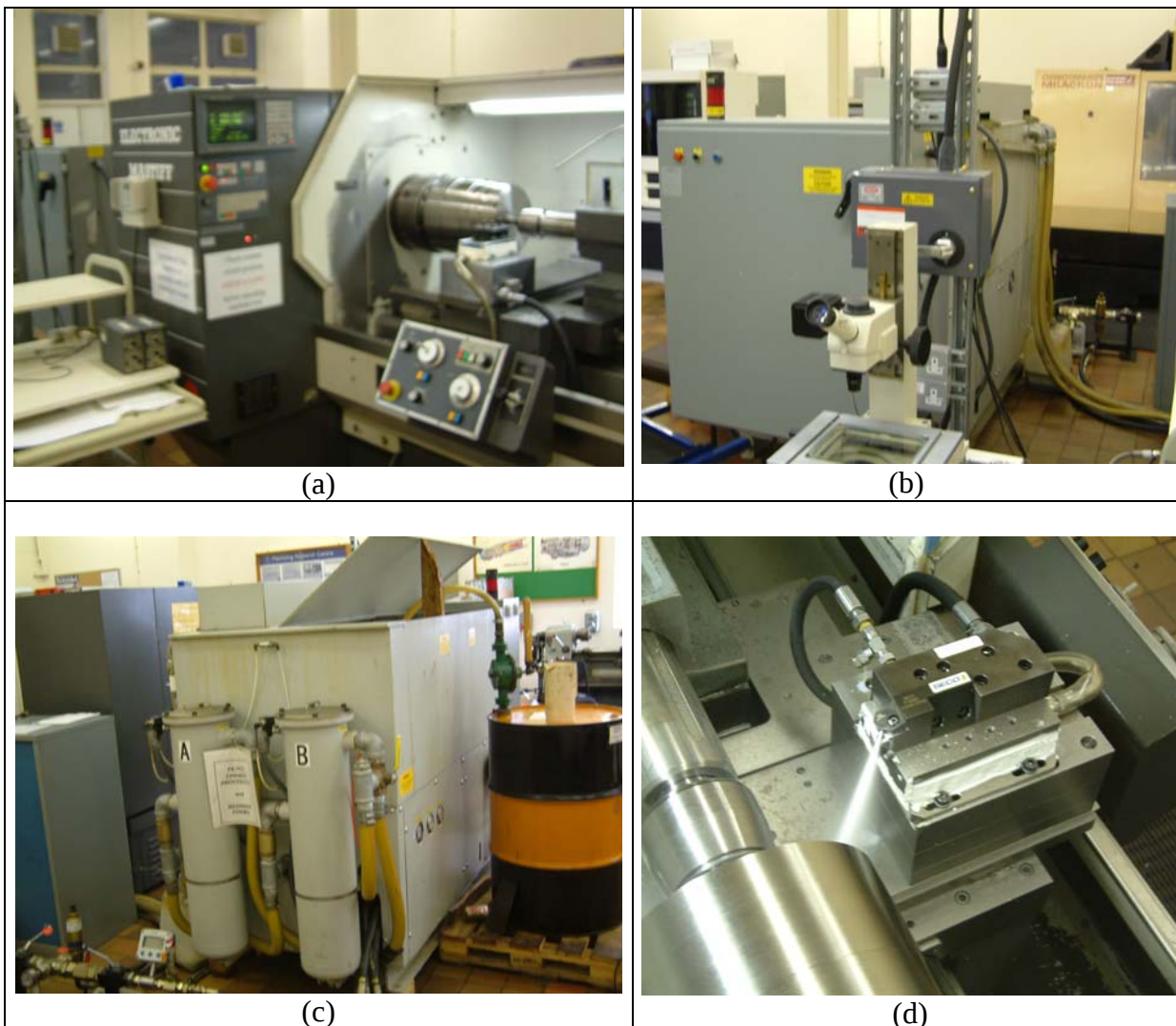


Figura 2. Torno CNC e unidade de aplicação de fluido de corte à alta pressão (*Chipblaster*) e seus componentes.

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios são de metal duro revestidas (PVD) - classe K - com geometria para quebra de cavacos e foram fornecidas pela empresa sueca *SECO Tools*. Os inserts possuem geometria rombóide com ângulo de 80°. As ferramentas e o porta-ferramentas utilizados nos ensaios possuem as seguintes especificações (Norma ISO), CNMG120412-M1 e PCLNR2525-M12, respectivamente. A composição química e principais propriedades físicas das

ferramentas são apresentadas na Tabela 3. A Tabela 4 apresenta a especificação da ferramenta e do porta-ferramenta utilizados nos ensaios.

Tabela 3: Composição química e propriedades físicas das ferramentas de metal duro utilizados nos ensaios.

Tamanho de grão (μm)	Densidade (g cm^{-3})	Composição química do substrato (% em peso)	Composição química e espessura do revestimento (% em peso)	Dureza (HV)	Resistência à ruptura transversal (MPa)	Condutividade térmica do substrato a 20°C ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
1,0	14,95	93,8% WC 0,2% (Ta, Nb)C 6% Co	TiAlN (3,5 μm) TiN (0,5 μm)	1760	4100	110

A geometria final, após montagem da ferramenta no porta-ferramenta, apresenta um ângulo de posição de 95° , ângulo de saída de -6° , ângulo de folga principal de 6° e ângulo de inclinação de -6° .

As seguintes condições de corte foram utilizadas nos ensaios de torneamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V:

- Avanço, f (mm rot^{-1}): 0,15.
- Profundidade de corte, a_p (mm): 0,5.
- Velocidade de corte, V (m min^{-1}): 110, 120 e 130.
- Formas de aplicação de fluido de corte:
 - convencional (sobre-cabeça) a uma vazão de $2,7 \text{ l min}^{-1}$.
 - alta pressão (HPC) de 11 MPa (110 bar) a uma vazão de $18,5 \text{ l min}^{-1}$.

Os seguintes critérios de fim de vida de ferramenta para a operação de torneamento de acabamento (Norma ISO 3685 de 1977) foram utilizados nos ensaios.

- Desgaste médio de flanco (flank wear), $VB \geq 0,3 \text{ mm}$
- Desgaste máximo de flanco, $VB_{\text{max}} \geq 0,4 \text{ mm}$
- Desgaste de entalhe (notch wear), $VN \geq 0,6 \text{ mm}$
- Desgaste de ponta (nose wear), $VC \geq 0,3 \text{ mm}$
- Falha prematura ou quebra da ferramenta, F
- Rugosidade da superfície usinada (R_a), $> 1,6 \mu\text{m}$ (média da linha central)

As medições do desgaste das ferramentas para determinação do fim de vida foram realizadas com o auxílio de um microscópio óptico do tipo “ferramenteiro” com aumento de 20x. O desgaste da ferramenta foi monitorado após cada passe completo da ferramenta. As medições da rugosidade superficial foram realizadas ao fim de cada passe da ferramenta e para isso foi utilizado o rugosímetro portátil modelo Surtronic-10. A peça era rotacionada e três leituras eram realizadas em posições diferentes ao longo do diâmetro da peça. O valor de rugosidade média (R_a) era obtido por meio do cálculo da média aritmética entre as leituras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os resultados de vida das ferramentas de metal duro em função da velocidade de corte no torneamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V utilizando as técnicas de aplicação de fluido à alta pressão (11 MPa) e convencional. Como esperado, a vida da ferramenta diminui com o aumento da velocidade de corte. Verifica-se que técnica HPC prolongou a vida da ferramenta de corte em todas as condições testadas. Cerca de 39 min de vida de ferramenta foi registrado utilizando a alta pressão de aplicação do fluido (11 MPa), contra 11 min obtidos com a técnica convencional, a uma velocidade de corte de 110 m min^{-1} , que indica um aumento superior a

350% na vida da ferramenta. Para as velocidades de corte de 120 m min^{-1} e 130 m min^{-1} o aumento da vidas das ferramentas foi similar (370%) quando a técnica HPC foi utilizada. A explicação pelo prolongamento da vida das ferramentas está relacionada com a capacidade do jato à alta pressão tem de penetrar na zona de corte e de melhorar a eficiência do fluido de corte no sentido de exercer as funções refrigerante-lubrificante na região de corte, reduzindo a área de contato cavaco-ferramenta e, conseqüentemente, reduzindo a temperatura média da interface cavaco-ferramenta e a taxa de desgaste da ferramenta. Percebe-se ainda que em termos de produtividade, a técnica HPC permite aumentar a velocidade de corte em quase 20% (110 m min^{-1} para 130 m min^{-1}) e ainda assim oferecendo uma vida de ferramenta em torno de 70% maior que aquela obtida com a utilização da técnica convencional e velocidade de corte de 110 m min^{-1} . Com isso, a técnica HPC permite o acesso à usinagem a altas velocidades de corte (HSM), pois em condições normais são utilizadas velocidades de corte em torno de $60\text{-}70 \text{ m min}^{-1}$.

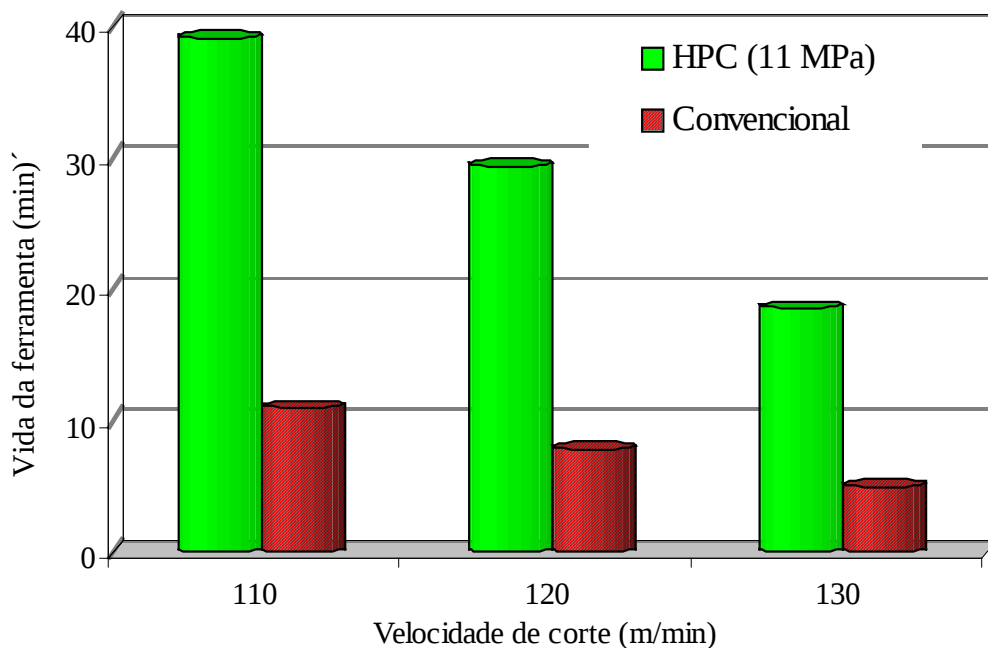


Figura 3: Vida das ferramentas de metal duro em função da velocidade de corte e do sistema de aplicação de fluido de corte durante o torneamento da liga Ti-6Al-4V.

A Figura 4 apresenta os valores de rugosidade das superfícies da liga Ti-6Al-4V em função da velocidade de corte e da técnica de aplicação de fluido de corte. Verifica-se que todos os valores de rugosidade das superfícies usinadas estão bem abaixo do valor estipulado como critério de rejeição de $1,6 \mu\text{m}$. Observa-se que os menores valores de rugosidade foram gerados quando a técnica de aplicação de fluido convencional foi utilizada, e para esta condição a rugosidade praticamente não foi alterada pelo aumento da velocidade de corte. $0,5 \mu\text{m}$ foi o valor da rugosidade da superfície para ambas as velocidades de corte de 110 e 120 m min^{-1} , e $0,6 \mu\text{m}$ para a velocidade de corte de 130 m min^{-1} . Quando a técnica HPC foi empregada, os valores de rugosidade da superfície foram ligeiramente superiores àqueles obtidos por meio da técnica convencional, alcançando o valor máximo de $0,8 \mu\text{m}$ para as velocidades de 110 e 130 m min^{-1} . Essa pequena margem de aumento dos valores de rugosidade da superfície obtidos pela técnica HPC pode ser atribuída aos pequenos cavacos fragmentados produzidos pela técnica HPC. Estes cavacos são lançados à superfície já usinada pela ação do jato à alta pressão os quais causam pequenas marcas na superfície da peça, afetando o acabamento superficial da mesma.

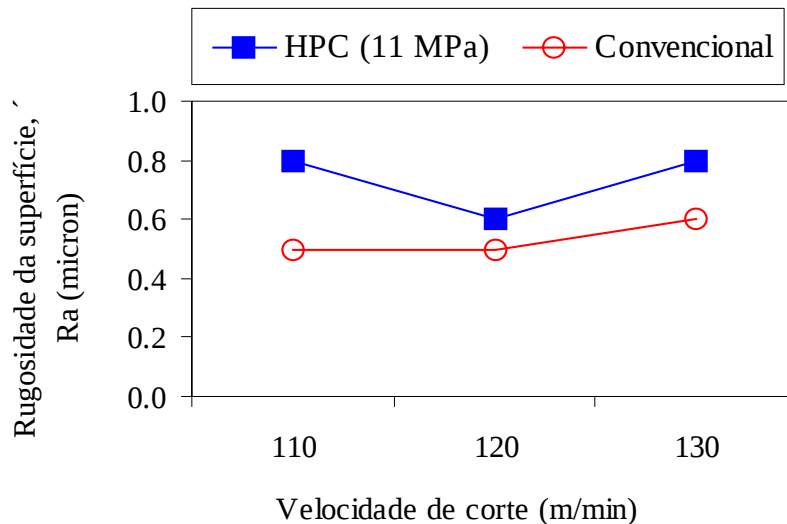


Figura 4: Valores de rugosidade da superfícies usinadas em função da velocidade de corte e da técnica de aplicação de fluido de corte após torneamento da liga Ti-6Al-4V com ferramentas de metal duro.

4. CONCLUSÕES

1. A vida da ferramenta de metal duro revestida diminui com o aumento da velocidade de corte no torneamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V.
2. A técnica HPC com pressão de aplicação de 11 MPa prolongou a vida da ferramenta de metal duro nas condições investigadas. Cerca de 370% de aumento na vida da ferramenta foi alcançado com a técnica HPC quando velocidades superiores a 110 m min^{-1} foram empregadas, comparado à técnica convencional de aplicação de fluido de corte.
3. A técnica HPC promoveu o aumento da produtividade em termos de aumento da velocidade de corte (em torno de 20%) no torneamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V, comparada à técnica convencional, e com isso possibilitando à usinagem desta liga a altas velocidades de corte (HSM).
4. Os valores de rugosidade da superfície (Ra) obtidos em todas as condições testadas ficaram abaixo do valor estipulado com critério de rejeição.
5. A técnica HPC produziu valores de rugosidade da superfície ligeiramente superiores aos obtidos por meio da técnica convencional de aplicação de fluido de corte, e a velocidade de corte não exerceu forte influência nestes valores.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento e Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, à empresa Rolls-Royce plc e à London South Bank University (Londres-Inglaterra) por terem permitido que este trabalho fosse realizado, através da infra-estrutura laboratorial e fornecimento do material da peça e de ferramentas de corte. Os autores agradecem também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU.

6. REFERÊNCIAS

Aspinwall, D.K, Dewes, R., Mantle A.L. and Ng, E-G., 2003, "HSM takes off in the Aerospace Sector", [Online] Disponível no site: www.delcam.com/info/articles/hsm_rollsroyce.htm, (acessado em 07 de maio de 2003), pp.1-4.

- Dahlman, P., 2000, "High Pressure Jet-Assisted Turning – Chip Control and Temperature Reduction", Thesis for the Degree of Licentiate Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, p. 31.
- Ezugwu, E.O. and Wang, Z.M., 1997, "Titanium alloys and their machinability – a review", *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, Science S.A., Vol. 68, pp. 262-274.
- Ezugwu, E.O, Bonney, J. and Yamane, Y., 2003, "An Overview of the Machinability of Aeroengine Alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier Science B.V., Vol. 134, pp. 233-253.
- Ezugwu, E.O., Da Silva, R.B., Bonney, J. and Machado, A.R., 2004a, "The Effect of Argon Enriched Environment in High Speed Machining of Titanium Alloy", 59th. Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE) Annual Meeting, Sheraton Centre, 16-20 May, Toronto, Canada.
- Ezugwu, E.O., Fadare, D.A., Da Silva, R.B., Bonney, J. and Shabazz Nelson, A., 2004b, "Wear prediction of Uncoated Carbide Tool during High Speed Turning of Ti-6Al-4V alloy using Artificial Neural Network", *Proceedings of Second International Conference on Manufacturing Research - ICMR 2004*, Sheffield Hallam University, 7-9 September, England, U.K., pp. 36-41.
- Field, M., 1968, "Machining Aerospace Alloys", ISI - Spec. Rep., 94, pp. 151-160.
- Kaminski, J. and Dahlman, P., 1999. "Chip-Forming Possibilities in High-Pressure Jet Assisted Turning", *Proceedings of the International Symposium on New Applications of Water Jet Technology*, Ishinomaki, Japan.
- Kishi, K., Eda, H., Furusawa, T. and Ichida, Y., 1975, "Some Aspects for the Cooling and Lubrication Effects by a Jet Infusion Method", *Proc. of the JSLE-ASLE, Int. Lub. Conf.*, Tokyo, Japan, 9-11 June, pp. 579-587.
- Klocke, F., Fritsch, R. and Gerschwiler, K., 2002, "Machining Titanium Alloys – A Continuous Challenge in Manufacturing", *5th International Conference on Behaviour of Materials in Machining*, 12-13 November, Chester, United Kingdom, pp. 251-258.
- Lindeke, R.R., Shoenig, F. C., Khan, A. K. and Haddad, J., 1991a, "Machining of α - β Titanium with Ultra High Pressure through the Insert Lubrication/Cooling", *Transactions NAMRI/SME*, pp. 154-161.
- Lindeke, R.R., Shoenig, F. C., Khan, A. K., 1991b, "Cool your Jets", *Cutting Tool Engineering*, October 1991, 35-37.
- Machado, A.R., 1990, "Machining of Ti-6Al-4V and Inconel 901 with a High Pressure Coolant System", Ph.D. Thesis, University of Warwick, p. 288.
- Machado, A.R., Da Silva, R.B., Ezugwu, E.O. and Bonney, J., 2004, "Fluido de corte aplicado à alta pressão é a solução para usinagem de liga de titânio em HSM", *Usinagem 2004 – Feira e Congresso*, Expo Center Norte, 27-29 de outubro, São Paulo, Brasil, p. 14.
- Magalhães, C.A. e Ferreira, J.R., 2004, "Usinagem por torneamento em acabamento da liga de titânio 6Al-4V", *Usinagem 2004 – Feira e Congresso*, Expo Center Norte, 27-29 de outubro, São Paulo, Brasil, p. 18.
- Mantle, A.L. and Aspinwall, D.K., 1998, "Tool Life and Workpiece Surface Roughness when High Speed Machining a Gamma Titanium Aluminide", *Progress of Cutting and Grinding*, *Proceedings of the Fourth International Conference on Progress of Cutting and Grinding*, 5-9 October, Urumqi and Turpan, China, International Academic Publishers, pp. 89-94.
- Mazurkiewicz, M., Kubala, Z. and Chow, J., 1989, "Metal Machining with High-Pressure Water-Jet Cooling Assistance – A New Possibility", *Journal of Engineering for Industry*, *Transactions of the ASME*, Vol. 111, pp. 7-12.
- Metals Handbook, 1989, "Machining", American Society for Metals, 9th edition, Vol. 16, pp. 597-606.
- Pigott, R. J. S. and Colwell, A.T., 1952, "Hi-Jet System for increasing Tool Life", *SAE Quarterly Transaction*, Vol. 6, No. 3, pp. 547-566.
- Seco Tools, 2002, "Turning Difficult-To-Machine Alloys", Technical Guide, p. 21.

- Sharma, C.S., Rice, W.B. and Salmon, R., 1971, "Some effects of injecting cutting fluids directly into the chip-tool interface", Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, Vol. 93, May, pp. 441-444.
- Vigneau, J., 1997, "Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas", Revista Máquinas e Metais, Aranda Editora, Brasil, Ano XXXII, N. 380, Setembro 1997, pp. 16-32.
- Wertheim, R., Iscar Ltd., Rotberg, J. and Ber, A., 1992, "Influence of High-Pressure Flushing through the Rake Face on the Cutting Tool", Annals of the CIRP, Vol. 41, No. 1, pp. 101-106.

INCREASING THE PRODUCTIVITY IN TURNING OF Ti-6Al-4V ALLOY WITH ACCESS TO HSM EMPLOYING THE HIGH PRESSURE COOLANT TECHNIQUE

Rosemar Batista Da Silva

Álison Rocha Machado

Federal University of Uberlandia, Faculty of Mechanical Engineering, Av. João Naves de Avila, 2.121, Uberlandia – MG, CEP. 38.408-100, Brazil.

E-mail: alisonm@mecanica.ufu.br

Emmanuel O. Ezugwu

John Bonney

London South Bank University, Machining Research Centre, Faculty of Engineering, Science and the Built Environment, 103 Borough Road, London, SE1 0AA, England, U.K.

Abstract: *Machining of titanium alloys has always been a topic of great interest and study worldwide since these alloys possess some characteristics during machining which impair their machinability, hence they are referred to as difficult-to-machine materials. Titanium alloys are generally machined at relatively low cutting speeds due to the accelerated tool wear. This paper shows that is possible to increase the productivity in finish turning of titanium-base, Ti-6Al-4V alloy (IMI 318), in terms of prolonging tool life at higher speed machining (HSM,) by employing the high pressure coolant supply technique (HPC). Cemented carbide tools (ISO K-10 grade), usually the most recommended tools for machining of titanium alloys, were employed for the machining trials. Tool life and surface roughness were monitored and used to assess the performance of HPC technique. The following cutting conditions were employed: cutting speeds of 110, 120 and 130 m min⁻¹, feed rate of 0,15 mm rev⁻¹ and a constant depth of cut of 0,5 mm. A jet pressure of 11 MPa (110 bar) was applied in machining trials. Comparative trials were also carried out at the same cutting conditions under conventional coolant supply (overhead cooling). The tests results also show that low surface roughness values can be obtained by using HPC technique and these values were slightly higher than those obtained by using the conventional coolant supply.*

Key-words: *machining of titanium, high pressure coolant, tool life, HSM, cemented carbide tool.*