

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE NO TORNEAMENTO DA LIGA Ti-6Al-4V

Fernando César Yukio Cursino Sato, fcsato@gmail.com
João Paulo Casemiro de Vilas Boas, jpcaboas@hotmail.com
Marcos Valério Ribeiro, mvalerio@feg.unesp.br

Laboratório de Estudo da Usinagem da Faculdade de Engenharia - UNESP – Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 CEP 12516-410 – Guaratinguetá/SP – Brasil

Resumo: A indústria aeronáutica e aeroespacial, frente às mudanças ocorridas nos últimos anos no transporte aéreo de massa e com o desenvolvimento de novos produtos, exige uma disponibilidade maior de novos materiais dos quais se tenha quantidade de informações suficientes para seu processamento. A influência que a usinabilidade exerce sobre a produtividade e o custo final de produção serve como parâmetro para reforçar a necessidade da preocupação não só com desenvolvimento de materiais com propriedades mecânicas, físicas e químicas superiores e/ou particulares, mas também com o comportamento desses materiais quando submetidos a algum tipo de processo de manufatura. Os parâmetros principais que podem ser medidos em uma operação de corte de um metal são: força, rugosidade da superfície, dimensão do cavaco, deformação, desgaste da ferramenta e temperatura. A proposição deste trabalho é o estudo do comportamento em usinagem, especificamente para o torneamento em acabamento, da liga Ti-6Al-4V. Para tanto, as atividades desenvolvidas possibilitarão o estudo do desgaste apresentado nas ferramentas, da relação entre a rugosidade e os parâmetros de corte utilizados, além do efeito das diferentes formas de aplicação do fluido de corte durante a operação de usinagem, ou seja: usinagem a seco, MQF (mínima quantidade de fluido) e aplicação abundante. Os ensaios de usinagem foram realizados com quatro tipos de ferramentas de corte diferentes todas na geometria VBMT110204-UF, sendo as classes: metal duro sem cobertura; metal duro com cobertura externa de óxido de alumínio; metal duro recoberto com TiAlN; e Cermet sem cobertura. A comparação dos resultados de rugosidade e desgaste em relação ao comprimento de corte foi feita para os seguintes parâmetros: $V_c = 110$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta e $ap = 0,5$ mm. Resultados promissores a respeito da vida obtida para um VB de 0,6 mm utilizando a técnica do MQF foram obtidos.

Palavras-chave: usinagem, titânio, fluido de corte, desgaste, rugosidade

1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem de ligas de Ti-6Al-4V é de custo elevado e o crescimento de suas aplicações em várias áreas da engenharia incentivam a realização de algumas análises sobre a otimização de suas condições de usinagem, como por exemplo a utilização de fluidos de corte para reduzir o desgaste de ferramentas e aumentar a produtividade (Sato et al., 2007). Surgem então novos conceitos, como a usinagem com quantidades mínimas de fluido (MQF), uma vez que esses fluidos representam grande parcela do custo final da peça, como consequência de gastos com a manutenção e descarte. Um dos principais fatores que influenciam no estado final da peça usinada, além das condições de usinagem, é a forma e a quantidade de aplicação dos fluidos de corte no processo. Isto fica ainda mais evidente quando se questionam os custos com os fluidos de corte no setor produtivo, estimados em cerca de 17% dos custos de produção.

Em razão da sua excelente resistência à corrosão e boa resistência mecânica, o titânio e suas ligas são muito utilizados em aplicações químicas e petroquímica, ambientes marinhos e na fabricação de implantes em geral. Ligas de titânio não apresentam uma boa usinabilidade devido as suas propriedades físicas. Essas características causam uma elevação na temperatura de corte, resultando uma grande perda de ferramentas, mesmo com baixa velocidade de corte e avanço. Para materiais aeroespaciais incluindo as ligas de titânio, a velocidade convencional de corte varia de 30 m/min até 100 m/min usando-se ferramenta de metal duro (Donachie, 1987).

De acordo com Walter et al. (1993), o maior fator da vida curta da ferramenta no torneamento de ligas de Ti é o rápido desgaste da ferramenta. O que mais se usa é uma taxa de corte lenta para prevenir desgaste excessivo da ferramenta ou sua quebra. Devido as suas características físicas, assim como sua baixa condutividade térmica, o corte cria condições adiabáticas de cisalhamento. O cavaco formado na operação de usinagem é geralmente segmentado e

muito quente. Estas altas temperaturas podem causar a microsoldagem do cavaco na aresta de corte levando à falha precoce da ferramenta.

Segundo Ezwgwo e Wang (1997), no caso particular do titânio, interação entre o amolecimento, resultante do calor gerado durante a usinagem, e o encruamento na zona de cisalhamento dá origem a cavacos lamelares, também conhecidos como cavacos de cisalhamento. De acordo com outros estudos, aproximadamente 80% do calor gerado durante a usinagem é retido na ferramenta de corte favorecendo a adesão de cavaco na superfície de saída da ferramenta.

O cavaco aquecido em contato com a superfície de saída da ferramenta provoca uma rápida reação química responsável pelo aparecimento do desgaste de cratera (Lacalle *et al.*, 1998). Este tipo de desgaste ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. Isso pode não ocorrer em alguns processos de usinagem, principalmente quando se utilizam ferramentas de metal duro recoberta, ferramentas cerâmicas e quando o material é frágil (gera cavacos curtos). O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste frontal.

Conforme Novaski e Dörr (1999), os custos dos fluidos de corte, relacionados com o processo de usinagem são, freqüentemente, relegados a um segundo plano. Mas é importante que eles sejam observados ao lado dos custos fixos da instalação dos sistemas ligados ao uso dos mesmos. Neles, estão embutidos, por exemplo, os gastos feitos com fornecimento, tratamento e eliminação dos resíduos nocivos ao meio ambiente. Na Alemanha, os custos com eliminação, incluindo a separação dos cavacos, queima ou armazenamento dos resíduos, são mais elevados do que o fornecimento. Além disso, não se pode menosprezar a manutenção dos sistemas de armazenamento dos fluidos e o consumo de energia associado necessário, por exemplo, para o seu resfriamento.

Segundo Mason (2001), a idéia da usinagem quase sem fluido de corte é borrifar uma quantidade mínima de refrigerante e/ou lubrificante sobre a aresta de corte, técnica denominada Mínima Quantidade de Fluido (MQF). Freqüentemente, uma mistura ar-óleo é bombeada através da ferramenta diretamente na zona de corte. As vantagens incluem o baixo consumo de lubrificante, cavacos secos, nenhum descarte de refrigerante e ar mais limpo. A grande desvantagem está associada à necessidade de sistemas de exaustão de ar junto às máquinas, com o objetivo de proteger a saúde dos operadores, em função dos danos que a névoa produzida pelos sistemas pode provocar.

De acordo com Novaski e Dörr (1999), a usinagem a seco surge como um imperativo, na busca de redução de custos, aumento da produtividade e atendimento aos requisitos ecológicos, pois se torna cada vez mais indesejável o uso de sistemas de refrigeração na produção. Ao se abrir mão do uso de refrigerantes, porém, a sua influência positiva na usinagem também perde o efeito. As principais funções da refrigeração são: a redução do atrito (lubrificação), eliminação do calor (refrigeração) e auxílio ao transporte dos cavacos (limpeza). Com a falta de lubrificação, a camada de separação entre a ferramenta e o material não será mais suficientemente garantida e o atrito aumentará. Uma consequência para a ferramenta será o aumento do desgaste abrasivo e de adesão. Prevê-se, ainda, uma elevação da temperatura no processo.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como o objetivo do trabalho é realizar uma análise da influência da utilização de diferentes técnicas de usinagem no torneamento da liga de titânio Ti-6Al-4V, isso se realizou através de diferentes testes de torneamento nos quais se variou a estratégia de aplicação do fluido de corte como variação das condições de usinagem. Foram realizadas operações de acabamento em condições de usinagem sem aplicação de fluido de corte, com fluido de corte em abundância e também com a técnica de mínima quantidade de fluido (MQF), sendo observados durante os testes, os tipos de desgaste apresentados e também medida a intensidade destes, além da medição dos níveis de rugosidade da superfície dos corpos de prova, pois é esperado que os mecanismos de desgaste atuantes na ferramenta variem em função das modificações no processo. Amostras de cavaco foram colhidas após cada operação de usinagem, tanto nas operações a seco, quanto para as operações de usinagem com fluido de corte abundante, e posteriormente foram tiradas as fotos dos cavacos no final dos ensaios para uma primeira análise das características dos cavacos formados.

Os parâmetros de usinagem utilizados para os ensaios com o Titânio foram: velocidade de corte (v_c) de 110 m/min, profundidade de usinagem (ap) de 0,5 mm e avanço (f) de 0,1 mm/volta. Após cada operação de usinagem foi medida a qualidade da superfície gerada nos testes, através do rugosímetro e também foram observados os valores de desgaste de flanco (VB), através de uma lupa, até que o critério de fim de vida, baseado em desgaste fosse alcançado (VB=0,6mm). Com os valores obtidos foram construídos os gráficos de Desgaste de flanco "VB" x Comprimento de corte "Lc" e Rugosidade "Ra" x Comprimento de corte "Lc". Estes parâmetros foram escolhidos em função de trabalhos anteriores (Sato *et al.*, 2007), com o objetivo de se efetuar comparações posteriormente.

O material utilizado para a realização dos ensaios foi a liga de titânio Ti-6Al-4V de uso aeronáutico obtida junto à EMBRAER (Empresa Brasileira de Aeronáutica), o qual foi utilizado na forma de barras cilíndricas das quais foram confeccionados os corpos de prova.

Nos ensaios foram utilizadas as seguintes pastilhas intercambiáveis juntamente com o suporte SVJBR 2020K11: VBMT 110204-UF SANDVIK H13A: metal duro sem cobertura, (H13A); VBMT 110204-UF SANDVIK GC4225: metal duro com tripla cobertura por CVD, (4225); VBMT 110204-UF SANDVIK CT5015: Cermet sem cobertura, (5015); e VBMT 110204-UF SANDVIK GC1025: metal duro recoberto de TiAlN por PVD, (1025). Os materiais de ferramenta foram escolhidos em função de permitirem a utilização do mesmo quebra cavaco, embora a 5015 e a 4225 não se apresentarem como primeira opção de seleção, o intuito foi de permitir uma comparação

Para os ensaios realizados com a técnica do MQL utilizou-se o lubrificante LB 1000, fluido de base vegetal fornecido pela empresa ITW Chemical Products Ltda, a uma vazão de 4 ml/h. Para os ensaios com aplicação de fluido de corte em abundância o fluido utilizado foi o OP 38 EM da Petrobrás.

A máquina-ferramenta utilizada foi um torno CNC Romi Centur 30S, comando MACH 9, rotação máxima 3500 RPM, potência de 10 KW, do Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT/UNESP- Guaratinguetá). Quanto as fotografias digitais dos cavacos, estas foram feitas por meio da câmera digital Sony Cyber-shot 5.1 MP, com lentes Carl Zeiss. As medidas de rugosidade foram realizadas com o auxílio de um rugosímetro portátil Surftest 301 da Mitutoyo (com apalpador mecânico tipo estilete e raio de ponta de 5 μm), com a utilização de um comprimento de amostragem de 0,8 mm x 5.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos a serem apresentados são referentes aos ensaios realizados, a partir dos quais foi analisado o comportamento da rugosidade "Ra" em relação ao comprimento de corte e o tipo de ferramenta utilizada no ensaio, sendo que foram realizados ensaios sob condição de usinagem sem fluido de corte, Fig. (1), com fluido de corte abundante Fig. (2) e com mínima quantidade de fluido de corte (MQF) na Fig. (3).

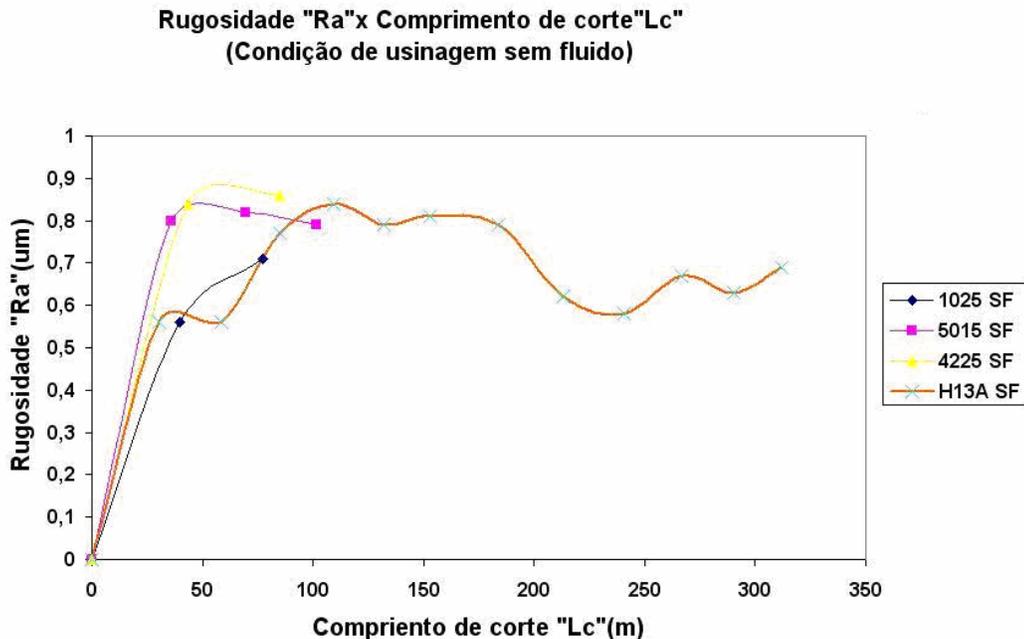


Figura 1. Resultados de rugosidade em relação ao comprimento de corte, sob condição de usinagem sem fluido.

Como se observa na Fig. (1), todas as ferramentas apresentaram valores de rugosidade muito próximos, para um intervalo de comprimento de corte até 50 metros, porém a ferramenta que apresentou o melhor resultado em relação à vida foi a **H13A**, conforme será apresentado no próximo item, mas que é possível ser identificado pelo gráfico, pois todos os ensaios foram interrompidos para um VB de 0,6 mm.

Para a condição de usinagem com fluido de corte em abundância não ocorreram melhorias nos resultados para as ferramentas **1025**, **5015** e **4225**, ou seja, para um intervalo até 100 metros a variação dos valores de rugosidade são praticamente os mesmos. Já para a ferramenta **H13A**, foi observado que a rugosidade apresentou uma menor variação em um maior intervalo de comprimento de corte. Apenas ocorreu uma considerável variação da rugosidade após os 700 metros, provavelmente devido ao acentuado desgaste da ferramenta.

Conforme pode ser observado na Fig. (2), os valores de rugosidade apresentados, para as ferramentas **1025**, **4225** e **Cermet**, para um comprimento de corte até 50 metros não foram muito diferentes dos obtidos nos ensaios com condição de usinagem sem fluido e usinagem com fluido de corte abundante. Já para a ferramenta **H13A** houve uma grande variação dos valores de rugosidade em comprimentos de corte acima de 50 metros, provavelmente devido às condições de lubri-refrigeração serem intermitentes.

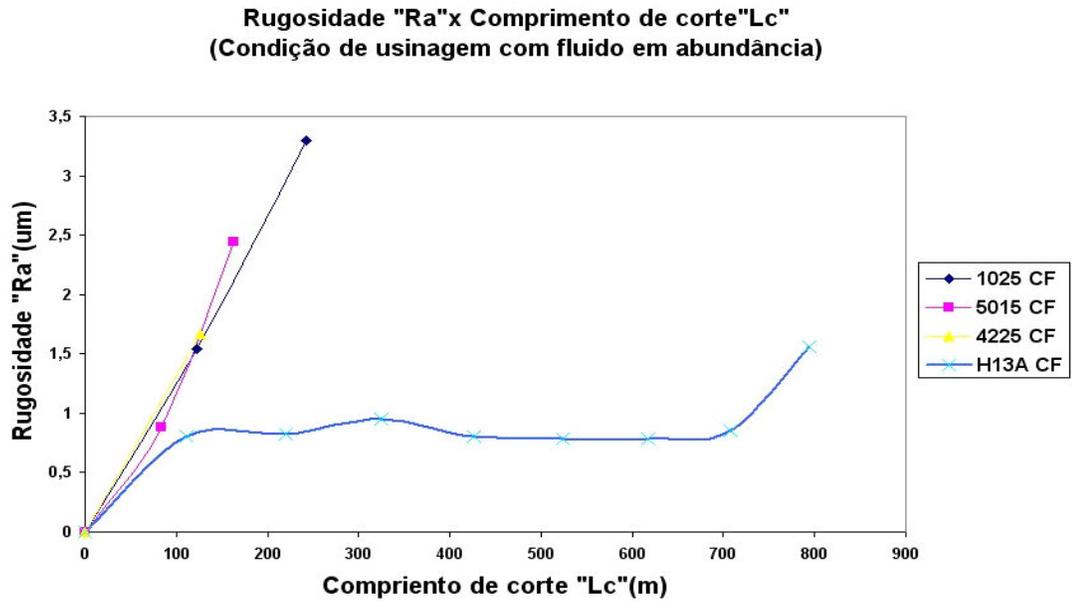


Figura 2. Resultados de rugosidade em relação ao comprimento de corte, sob condição de usinagem com fluido de corte abundante.

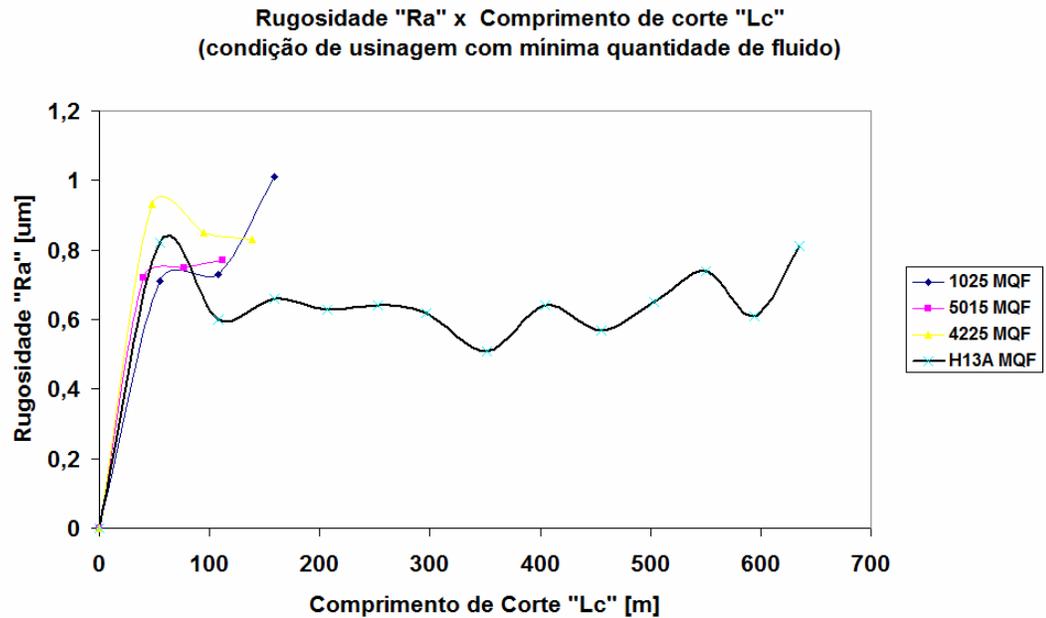


Figura 3. Resultados de rugosidade em relação ao comprimento de corte, sob condição de usinagem com mínima quantidade de fluido.

Pode-se observar também, que os valores de rugosidade em relação ao comprimento de corte tanto para a condição de usinagem com fluido de corte abundante quanto para condição de corte com mínima quantidade de fluido (MQF), apresentaram os melhores resultados para a ferramenta **H13A**. Porém os valores obtidos para a condição com fluido em abundância permaneceram mais constantes ao longo de comprimentos de corte acima de 100 metros, em relação aos valores obtidos na condição de usinagem MQF, que foram mais oscilantes ao longo de comprimentos acima de 100 metros.

Após os ensaios foi possível analisar e comparar os resultados referentes ao desgaste de flanco "VB" em relação ao comprimento de corte para as condições de usinagem sem fluido de corte, Fig. (4), com fluido de corte abundante, Fig. (5) e com a técnica de mínima quantidade de fluido, Fig. (6).

Como pode ser observado na Fig. (4), a ferramenta **H13A** obteve o melhor resultado quanto ao desgaste de flanco, provavelmente devido a sua menor reatividade com o material usinado e maior resistência a abrasão, pois mantém a sua integridade superficial. Para as demais ferramentas observou-se o rápido desgaste para um comprimento usinado consideravelmente baixo, isto é resultado das elevadas temperaturas na região de corte, que acentuam a reatividade entre os materiais das ferramentas e o Titânio e também devido ao elevado efeito abrasivo promovido pela passagem do cavaco.

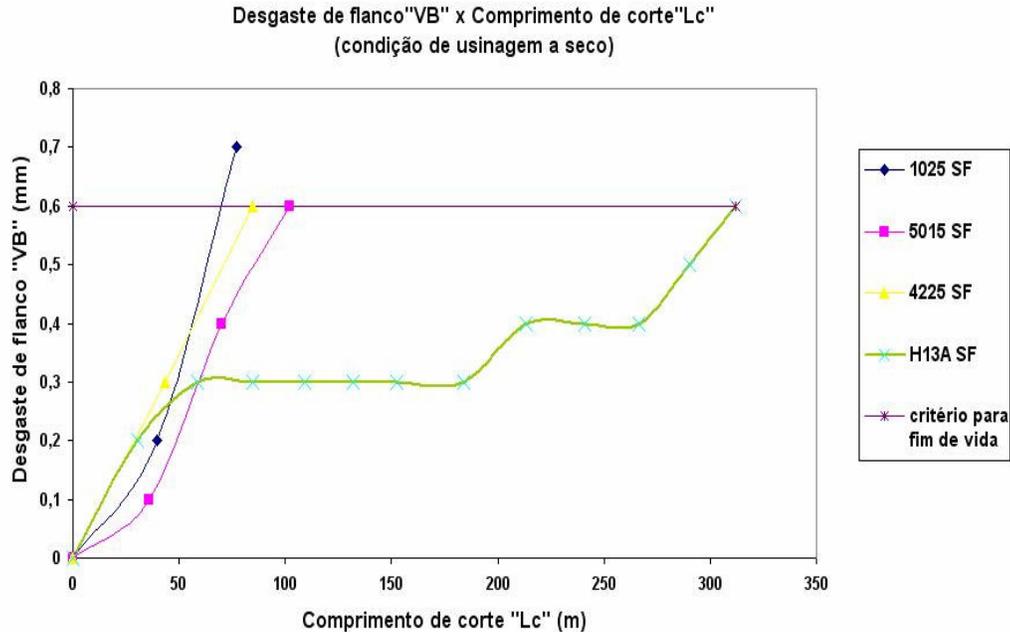


Figura 4. Resultados de desgaste de flanco em relação ao comprimento de corte, sob condição de usinagem sem aplicação de fluido.

Com relação ao ensaio das ferramentas com aplicação abundante de fluido de corte, é possível observar melhores resultados quanto ao comprimento de corte das ferramentas, que foi praticamente duas vezes maior do que para o ensaio sem aplicação de fluido. Assim sendo, ferramenta **H13A** foi a que se destacou com os melhores resultados, apresentando um desgaste de flanco máximo para um comprimento de corte de 800 metros, Fig. (5).

Com relação às ferramentas **1025** e **5015**, ocorreu uma melhoria quanto à progressão do desgaste de flanco, isto possivelmente em função das menores temperaturas na região de corte, devido a presença constante do fluido de corte.

Em relação aos valores de desgaste de flanco obtidos para usinagem em condição de mínima quantidade de fluido (MQF), novamente os melhores resultados foram para a ferramenta **H13A**, Fig. (6), sendo estes muito mais próximos aos encontrados para a usinagem com fluido abundante do que para os da condição sem aplicação de fluido, porém atingindo o desgaste de flanco máximo em um comprimento usinado de 600 metros.

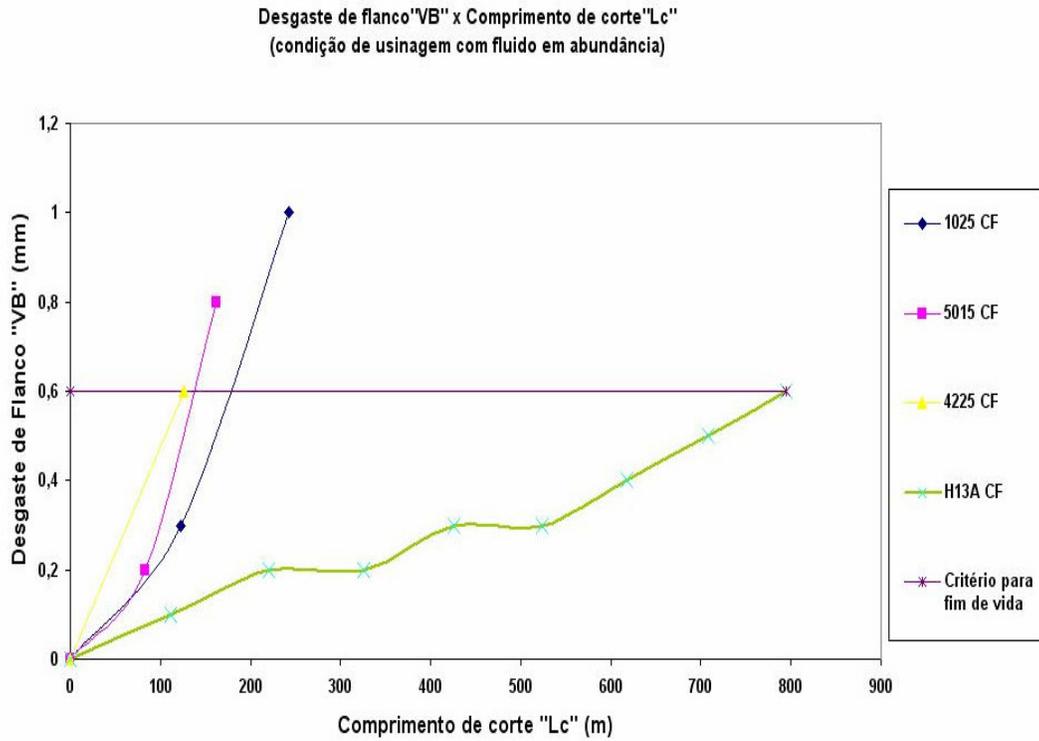


Figura 5. Resultados de desgaste de flanco em relação ao comprimento de corte, sob condição de usinagem com fluido em abundância.

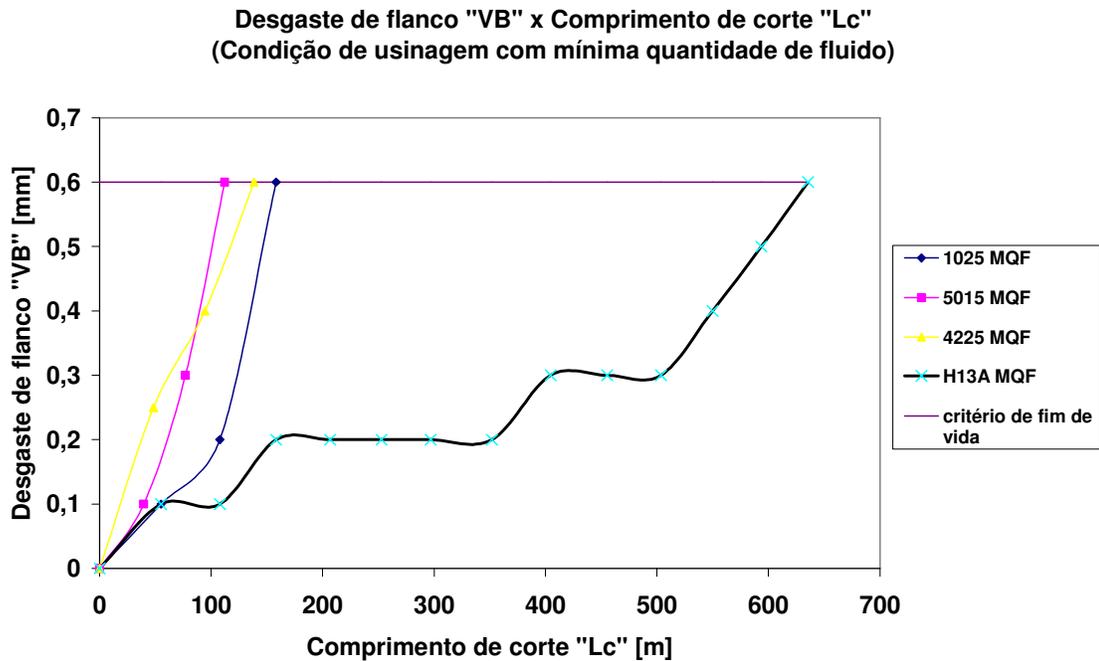


Figura 6. Resultados do desgaste de flanco "VB" em relação ao comprimento de corte "Lc", da usinagem da liga Ti-6Al-4V sob condição de usinagem MQF.

Neste trabalho somente foram analisados os tipos de cavacos formados durante os processos de usinagem nas diferentes condições de lubri/refrigeração e as prováveis causas da formação daqueles. Como se observa na Fig. (7),

para a condição de usinagem sem fluido os cavacos obtido também são do tipo “fita”, porém são mais quebradiços, provavelmente devido às altas temperaturas na região de formação do cavaco.

Na condição de usinagem com fluido abundante observa-se que os cavacos apresentam elevada deformação plástica Fig. (8), assim os cavacos formados são do tipo “fita”, resultado provável dos baixos valores de avanço e profundidade de corte.

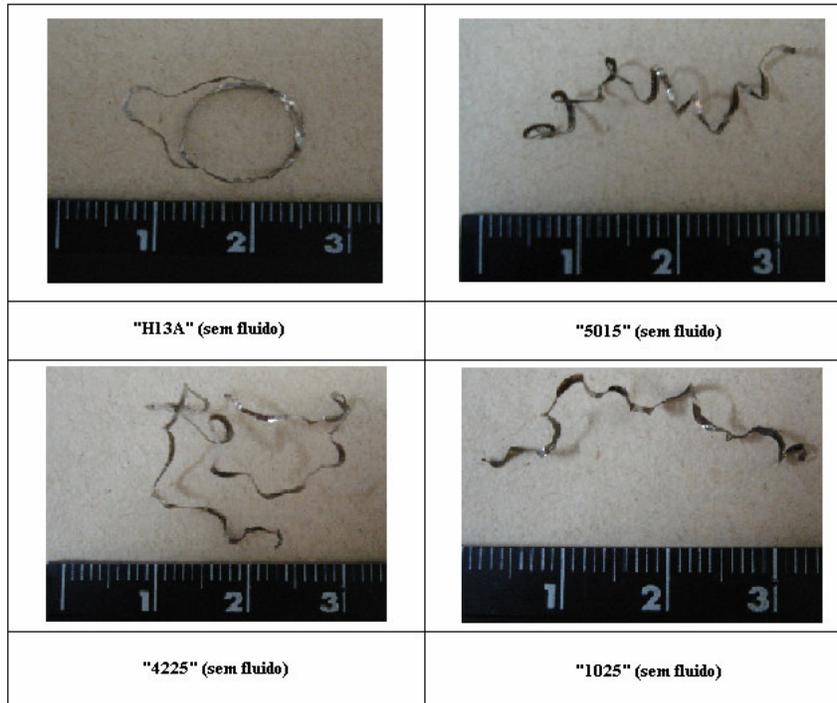


Figura 7. Imagens dos cavacos formados no processo de usinagem sem aplicação de fluido

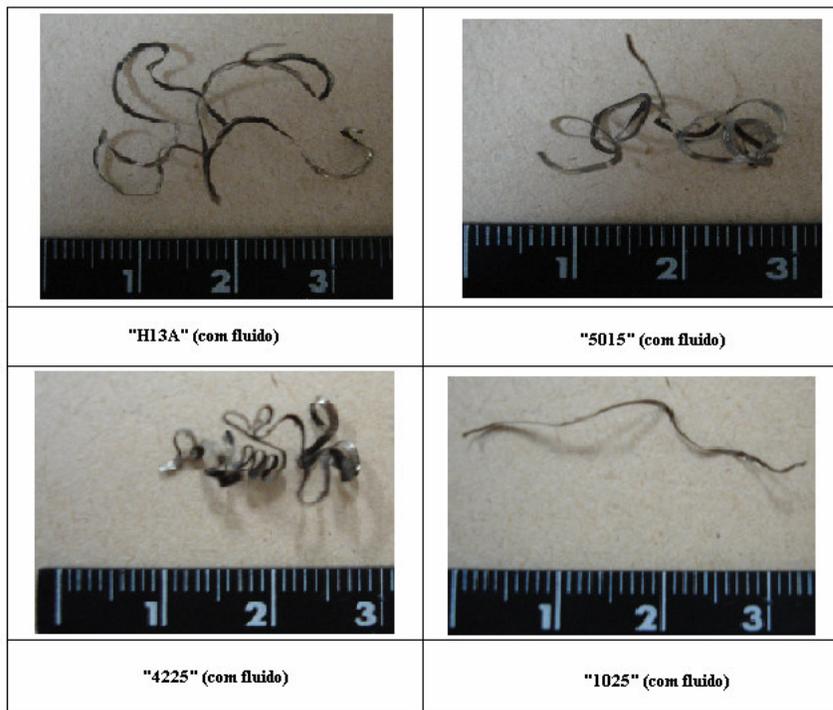


Figura 8. Imagens dos cavacos formados no processo de usinagem com aplicação de fluido de corte abundante

Na usinagem com mínima quantidade de fluido (MQF), para os procedimentos utilizando as pastilhas **H13A** e **5015**, pode-se observar que os cavacos formados são do tipo espiral, sendo estes quebradiços, provavelmente devido às elevadas temperaturas na região de corte Fig. (9).

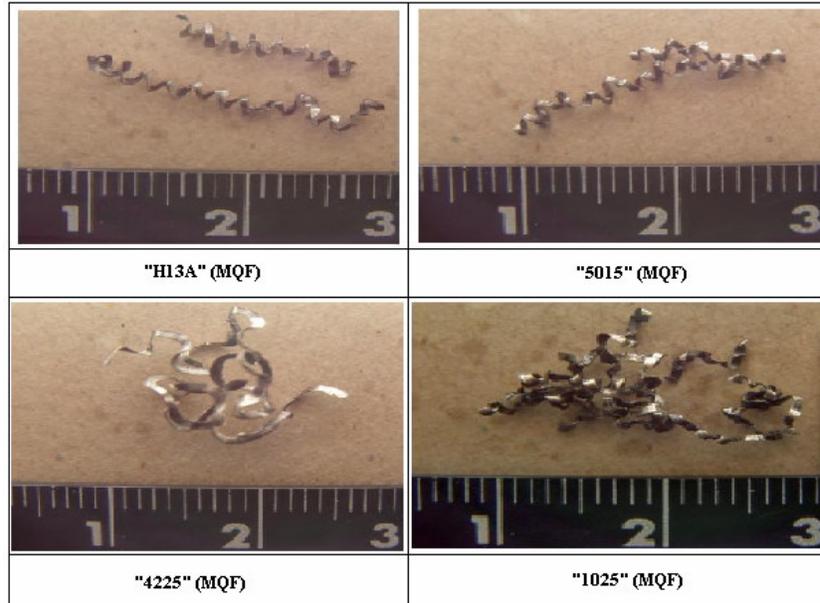


Figura 9. Imagem dos cavacos formados no processo de usinagem com aplicação de mínima quantidade de fluido (MQF)

4. CONCLUSÕES

Com relação aos ensaios realizados pode-se ressaltar o melhor desempenho que a ferramenta **H13A** apresentou em relação às demais ferramentas, mantendo níveis de rugosidade praticamente uniformes durante o processo de usinagem e também um comprimento de corte consideravelmente superior aos demais. Quanto as ferramentas **5015** (Cermet) e **1025** (recoberta com TiNAl) podemos observar baixos desempenhos, provavelmente devido a elevada reatividade do material destas ferramentas com o material da peça, pois ambos possuem titânio em suas composições. Quanto à ferramenta **4225** foi a que apresentou os resultados menos satisfatórios tanto para rugosidade quanto para níveis de desgaste de flanco, possivelmente em função do revestimento não permitir a presença de uma aresta de corte mais aguda o que propiciaria um corte mais eficiente e menores deformações do cavaco.

Os resultados de rugosidade superficial confirmam os resultados do desgaste, pois são diretamente influenciados pelos mesmos, é interessante notar, porém que entre as ferramentas testadas a ferramenta **H13A** apresentou durante todos os ensaios um melhor desempenho com baixos valores de rugosidade.

Cabe destacar que os resultados obtidos com a aplicação de mínima quantidade de fluido (MQF) embora tenham sido inferiores aos apresentados pela mesma ferramenta na condição de aplicação abundante de fluido, foram bem melhores que os apresentados na condição de usinagem sem fluido, abrindo uma perspectiva para que estudos sejam feitos no sentido de se aprimorar a utilização desta técnica para as ligas de difícil usinagem, para que as mesmas possam usufruir das vantagens da aplicação desta nova técnica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido da FAPESP, IFM II (CNPq), FUNDUNESP e SANDVIK.

6. REFERÊNCIAS

- Donachie, M.J.Jr., 1987, "A Technical Guide", ASM International Metals Park, OH 44073, U.S.A.
- Ezugwo, E.O, Wang, Z. M., 1997, "Titanium alloys and their machinability", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 68, pp. 262-274.
- López de Lacalle, L.N., Llorente, J.I., Sánchez, J.A., 1998, "Improving the cutting Parameters the machining of Nickel and Titanium alloys", Annals of the CIRP, Vol. 47, CD-ROM.
- Mason, F., 2001, "Usinando a seco ... ou quase a seco". Revista Máquinas e Metais, Vol. 37, No. 424, pp 160-173.
- Novaski, O. e Dörr, J., 1999, "Usinagem sem refrigeração", Revista Máquinas e Metais, Vol. 35, No. 398, pp. 18-27.

- Sato, F.C.Y.C.; Moreira, M.R.V.; Cunha, E.A. e Ribeiro, M.V., 2007, "A contribution to the study of Ti-6Al-4V turning", Proceedings of the 19th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, Brasília – Brazil, CD-ROM.
- Walter, J.L., Skelly, D.W., Minnear, W. P., 1993, "Ion implantation of cobalt-tungsten carbide tools for machining titanium". Wear, Vol. 170, pp. 79-82.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

STUDY OF COOLANT APPLICATION INFLUENCE ON Ti-6Al-4V ALLOY TURNING

Fernando César Yukio Cursino Sato
João Paulo Casemiro de Vilas Boas
Marcos Valério Ribeiro

Laboratory of Machining Study - São Paulo State University – Guaratinguetá - Brazil

Abstract. *The aeronautical and aerospace industry, front to the changes happened in the last years in the aerial transport of mass and with the development of new products, it demands a larger readiness of new materials of the which amount of enough information is had for your processing. The influence that the machinability exercises about the productivity and the final cost of production serves as parameter to reinforce the need of the concern not only with development of materials with mechanical properties, physics and chemistries superior and/or particular, but also with the behavior of those materials when submitted the some type of manufacture process. The main parameters that can be measured in an operation of cutting are: forces, roughness, chip dimension, deformation, tool wear and temperature. The proposition of this work is the study of the behavior in machining, specifically for the finishing turning, of Ti-6Al-4V alloy. For so much, the developed activities will make possible the study of the wear presented in the tools, of the relationship between the roughness and the cutting parameters used, besides the effect in the different ways of application of the cutting fluid during the machining operation, or be: machining the dry, MQF (low amount of fluid) and abundant application. The machining rehearsals were accomplished with four types of tools of different cut all in the geometry VBMT110204-UF, being the classes: cemented carbide uncoating; cemented carbide coating by aluminum oxide; cemented carbide coating by TiAlN; and Cermet uncoating. The comparison of the roughness and wear results in relation to the cutting length were made for the following parameters: $V_c = 110$ m/min, $f = 0,1$ mm/rev. and $a_p = 0,5$ mm. Resulted promising regarding the tool life obtained for a VB of 0,6 mm using the technique of MQF were obtained.*